

朱慧, 胡勇, 孙芬, 等. 基于 QA 权重 NDVI 时间序列重建效果评价研究——以长江流域为例 [J]. 地理科学, 2022, 42(11): 2019-2027. [Zhu Hui, Hu Yong, Sun Fen et al. Evaluation of reconstruction effect of NDVI time series based on QA weight: A case study of MODIS NDVI in the Yangtze River Basin. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(11): 2019-2027.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.11.016

基于 QA 权重 NDVI 时间序列重建效果评价研究 ——以长江流域为例

朱慧^{1,2}, 胡勇^{1,2}, 孙芬^{1,2}, 王强^{1,2}, 马雪莹^{1,2}

(1. 重庆市规划和自然资源调查监测院, 重庆 400020; 2. 自然资源部国土空间规划
监测评估预警重点实验室, 重庆 400020)

摘要: 通过计算质量频率和噪声比分析了长江流域 MODIS NDVI 质量情况, 然后基于常用的 S-G、A-G、D-L 这 3 种重建方法设计了 3 种质量权重方案, 对长江流域 2001—2020 年的时间序列 MODIS NDVI 数据进行重建, 最后采用视觉对比、优质区域保真性和模拟加噪的方法对重建效果进行分析评价。结果表明: 长江流域全年噪声比主要集中在 75%~125%, 其中冬季噪声对 NDVI 有较大的抑制效果, 春秋其次, 而夏季噪声对 NDVI 有增强效果; 基于质量权重方案三的 S-G 法对原始数据连续缺失的重建效果最好; 在高质量区域 A-G 法重建保真性较高, 高质量像元的 R^2 和 RMSE 均值为 0.9489 和 0.0245; 在模拟加噪实验中, S-G 法重建后数据丢失像元最少, 与原始数据的 R^2 平均值和标准差分别为 0.8616 和 0.1848, RMSE 为 0.0035~0.4411, 标准差为 0.0383, 表明在低质区域 S-G 法重建保真性较高。

关键词: NDVI 时间序列重建; 长江流域; 质量保证数据(QA)权重; Savitzky-Golay

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)11-2019-09

归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)是采用对植被比较敏感的遥感特征波段进行比值运算, 其值的大小与植被长势、覆盖度、生物量等植被生理生化参数具有密切的联系^[1-3]。利用多期 NDVI 数据构成时间序列曲线用于反映植被生理生化参数的时间变化特征, 可监测植被覆盖因季节变化或人类活动的影响, 广泛应用于植被动态监测、生物量估算、植被物候反演等众多研究领域^[4-6], 但 NDVI 数据受云雾遮挡、传感器性能衰退等因素的影响可能出现不同程度的缺失或误差, 进而影响时序数据的时空连续性, 导致长时序 NDVI 数据难以准确反映地表的真实变化信息, 影响陆地生态系统的时序遥感监测和模拟。因此, 为了提升 NDVI 数据的时空质量, 国内外学者针对 NDVI 时间序列重建方法开展了广泛的研究^[7-13], 其

中部分学者引入质量权重进行了植被指数重建^[14], 如程琳琳^[15]等在重建京津冀地区 EVI 时将 EVI 质量好和较好区域权重设置为 1.0 和 0.7, 质量差区域设置为 0。王正兴^[16]等在构建东南亚地区 NDVI 再分析数据集时将质量保证数据(QA)等于 0、1 或 2、3 的权重分别设为 1.0、0.5、0.1。Tao^[17]等在研究华北平原冬小麦冬前峰物候特征时将质量好、较好、冰雪覆盖和云掩地区分别设为 1.0、0.8、0.2、0.2。

但这些研究主要关注不同重建方法间的对比, 或某一权重系数设置对重建效果提升^[18,19], 未对比不同的质量权重系数对不同重建方法的影响。本文选择最常用的 Savitzky-Golay(简称 S-G 法)、非对称高斯函数拟合法(Asymmetric Gaussians, 简称 A-G 法)和双逻辑斯蒂函数拟合法(Double Logistic, 简称 D-L 法), 以长江流域 2001—2020 年的 MOD-

收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901386)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0548)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41901386), General Project of Chongqing Natural Science Foundation (cstc2019jcyj-msxmX0548).]

作者简介: 朱慧(1991-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 工程师, 主要从事自然资源遥感和地理信息系统应用研究。E-mail: pzbpbw@foxmail.com

通讯作者: 胡勇。E-mail: rihor@sina.com

IS NDVI 为例,根据研究区气候、植被特征和数据质量情况设计 3 种不同的权重设置方式,得到长江流域 2001—2020 年 9 种 NDVI 重建结果,并对其进行分析评价以提升经典重建方法的重建效果,可为 NDVI 缺失较为严重的区域的时序 NDVI 重建方法选择和权重系数设置提供参考。

1 研究区概况

长江流域是指长江干流和支流流经的广大区域(图 1),总面积 180 万 km^2 ,是世界第三大流域,具有丰富的水利资源、生物资源以及矿产资源。2021 年 3 月 1 日正式施行《中华人民共和国长江保护法》^[20],将长江流域的保护提升到了一个新的高度。区域内具有丰富的植被资源,主要分布有寒温带针叶林、落叶阔叶混交林、常绿阔叶林和山地常绿阔叶混交林等,应用遥感技术定量化研究长江流域植被演变特征、监测长江流域植被生长态势对于长江流域生态环境保护具有重要意义。长江流域大部分区域处于亚热带季风气候,年降水量 1070 mm,季风气候十分典型,云雨天气较多^[21],对光学卫星数据的影响较大,在时序遥感数据重建方面具有强烈的需求。

2 数据预处理

本研究选用的数据为 2000—2020 年的 MODIS NDVI 产品(MOD13A3)和 2000—2019 年的地表覆盖数据产品(MCD12Q1 type1),该数据下载自 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>,其中 MOD13A3 空间分辨率为 1 km,时间分辨率为月,

MCD12Q1 空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a。应用 MRT(MODIS Re-projection Tool)软件对两种数据进行批量提取、拼接、投影转换、重采样到 1 km、裁剪等处理,获取到长江流域 2000—2020 年历年各月 NDVI 和对应的质量保证数据(Quality Assurance, QA)以及 2000—2019 年历年的 MODIS 土地利用类型原始数据集(土地覆盖类型 1, Land Cover Type 1: IGBP global vegetation classification scheme)^[22-24]。对 QA 前两个 Bit 的数据进行质量转换处理,转换前后各值代表的情况如表 1 所示。

3 研究方法

3.1 NDVI 质量评估及权重设置

1)QA 质量频率分析。质量频率公式如下:

$$QA_i = \frac{m_i}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中, QA_i 是指一个像元不同 QA 质量出现的频率,其中 $i=0, 1, 2, 3$ 分别代表 NDVI 的质量情况, m_i 代表该像元的时间序列数据中质量为 $QA=i$ 的期数, n 为时间序列数据的总期数。

2)NDVI 噪声值分析。考虑到 1 a 中气候变化特征和植被自然生长规律,研究设计逐像元计算月噪声比的方式研究 NDVI 噪声值的分布,用于评估低质量 NDVI 随着月份的变化趋势,月噪声比公式如下:

$$NDVI_{noise,k} = \frac{\overline{NDVI}_{LQ,k}}{\overline{NDVI}_{HQ,k}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, k 为月份, $\overline{NDVI}_{LQ,k}$ 为第 k 月多年低质量

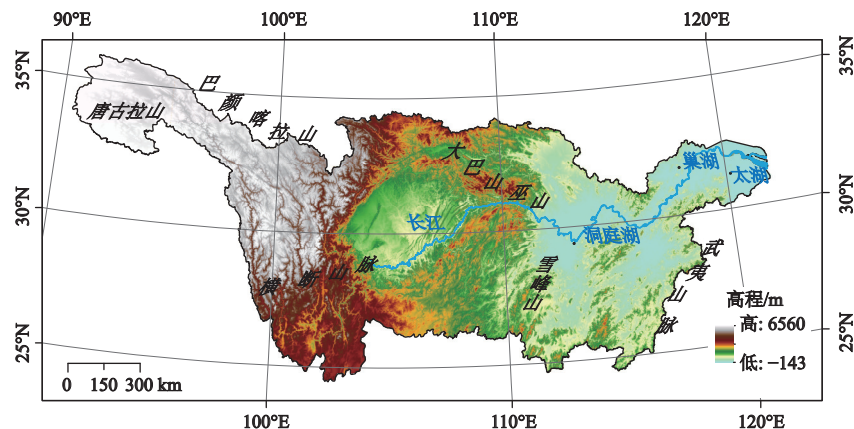


图 1 长江流域位置

Fig.1 Location of the Yangtze River Basin

表 1 质量评估数据对照表

Bit	转换后DN值	含义
00	0	VI产品具有良好的质量
01	1	VI产品需参考描述信息使用
10	2	VI产品受云污染
11	3	VI产品质量差

注: Bit代表转换前的数据质量。

($QA=2$ 或 3)NDVI 平均值, $\overline{NDVI}_{HQ,k}$ 为第 k 月多年高质量($QA=0$ 或 1)NDVI 平均值。

3)QA 质量权重设置方案。已有的相关研究对于权重设置的差异主要聚焦于: ① 是否设质量权重; ② $QA=2$ 或 3 时权重是否为 0 ; ③ 不同研究区 $QA=1, 2, 3$ 权重值的差异。结合长江流域上游山地多冰雪覆盖, 中下游地区梅雨季节数据质量较差的实际, 为保证参与重建的数据量充足, 通过反复试验决定将 $QA=1$ 和 $QA=2$ 或 3 权重分别设为 0.8 和 0.2 , 最终确定不设置权重、 $QA=2$ 或 3 设为 0 和均设权重 3 种方案, 分析不同质量权重方案下的重建效果。

3.2 时间序列重建方法

1)S-G 法(Savitzky-Golay, 简称 S-G)。它是由 Savitzky 和 Golay 于 20 世纪 60 年代提出, 通过在滑动窗口内对给定高阶多项式的最小二乘的卷积算法^[25]。

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i \times Y_{j+i}}{N} \quad (3)$$

式中, Y_{j+i} 和 Y_j^* 分别为重建前后的数据; C_i 为 S-G 多项式拟合的系数, 表示滤波器开始处理的第 i 个 NDVI 值的权重; m 为 i 的范围; N 为滑动窗口的数据点, 其值为 $2m+1$ 。需要设置 2 个参数。

2)非对称高斯函数拟合法(Asymmetric Gaussians, 简称 A-G)。它是将局部拟合函数整合为全局函数, 综合各局部函数使整体函数更为灵活。2002 年被 Jönsson 和 Eklundh 提出, 后被总结为区间提取、局部拟合和整体连接 3 个步骤^[26]。局部拟合函数为:

$$f(t) = f(t; c_1, c_2, a_1, \dots, a_5) = c_1 + c_2 g(t; a_1, \dots, a_5) \quad (4)$$

式中, $f(t)$ 为局部拟合函数; t 为时间; c_1 和 c_2 控制曲线

的基准和幅度; a_1 决定峰值或谷值的位置; a_2, a_3, a_4, a_5 控制曲线的宽度和陡度。 $g(a_1, \dots, a_5)$ 为时间 t 的高斯函数(公式 5)。局部拟合后通过整体函数 $F(t)$ 连接。

$$g(t; a_1, a_2, \dots, a_5) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t-a_1}{a_2}\right)^{a_3}\right], & \text{if } t > a_1 \\ \exp\left[-\left(\frac{a_1-t}{a_4}\right)^{a_5}\right], & \text{if } a_1 > t \end{cases} \quad (5)$$

$$F(t) = \begin{cases} \alpha(t)f_l(t) + [1 + \alpha(t)]f_c(t), & t_l < t < t_c \\ \alpha(t)f_c(t) + [1 - \alpha(t)]f_r(t), & t_c < t < t_r \end{cases} \quad (6)$$

式中, $F(t)$ 为整体函数, t_l, t_r 为时间序列数据中未拟合部分的区间, $\alpha(t)$ 为 $[0, 1]$ 的剪切系数, $f_l(t)$ 、 $f_c(t)$ 、 $f_r(t)$ 分别为区间内左边最小值、中间最高值和右边最小值的局部拟合函数。

3)双逻辑斯蒂函数拟合法(Double Logistic, 简称 D-L)。它是由 Beck 等在 2006 年提出的, 与 A-G 类似, 此算法也是一种局部拟合到整体连接的拟合函数, 只是其中的局部拟合函数 $g(a_1, \dots, a_5)$ 采用的是双逻辑斯蒂函数, 表达式如下:

$$g(t; a_1, \dots, a_4) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{a_1 - t}{a_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{a_3 - t}{a_4}\right)} \quad (7)$$

整体连接函数与 A-G 相同, 见公式(6)。

3.3 分析方法

1)视觉对比法。从视觉上对比连续噪声区域和非连续噪声情况下的重建效果。

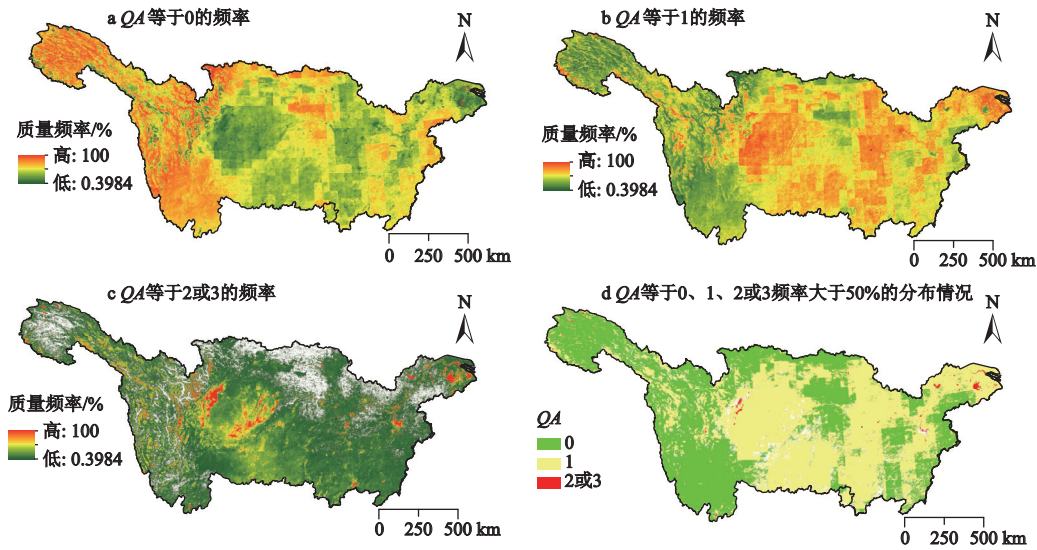
2)优质区域保真性法。通过对比质量好区域重建前后的拟合优度(R^2)和均方根误差(RMSE), 评价重建方法的保真性。其中, R^2 越大表明重建算法的保真性越好, 反之越差; RMSE 越小保真性越好, 反之越差。

3)模拟加噪法。通过对质量好区域添加噪声再重建的方式评价重建效果。

4 结果分析

4.1 NDVI 质量分布情况

1)NDVI 质量空间分布情况。本文经过对 2000—2020 年的 251 景 MODIS/QA 数据进行分析(2000 年只有 11 期), 分别提取 $QA=0, 1$ 以及 2 或 3 的数据并计算质量频率如图 2a~c, 为分析 NDVI 质量的总体分布, 多次实验分别提取 $0, 1, 2$ 或 3 频率大于 50% 的覆盖, 如图 2d 所示。



QA 为质量保证数据

图 2 2000—2020 年长江流域 NDVI 质量频率分布

Fig.2 NDVI quality frequency distribution of the Yangtze River Basin in 2000-2020

从分布来看, ① QA=0 频率较高的像元主要分布于长江流域上游的唐古拉山脉、巴颜喀拉山脉、横断山脉, 长江中游的大巴山脉和巫山山脉区域, 以及长江下游的雪峰山山脉、武夷山山脉, 占长江流域面积的 46.40%; ② QA=1 频率较高的像元主要分布于长江上游的四川盆地、华南低山丘陵及长江中下游平原, 占长江流域的 48.14%; ③ QA=2 或 3 频率较高的像元主要分布于西部山脉顶部常年冰雪覆盖区域, 四川盆地周围常年云雾覆盖区域, 以及长江、太湖、巢湖、洞庭湖等水域, 占长江流域面积的 0.49%; ④ QA 各质量等级频率小于 50% 分布

较为零散。NDVI 随高程的升高质量越好, 在少部分山脊地区质量有所下降。

2) 噪声 NDVI 值的分布特征。考虑近年来土地利用变化较大, 研究选取 2001—2005 年 NDVI 数据, 并提取 5 a 间 MCD12Q1 type1 具有植被意义的像元, 按表 2 所示分级对各月 $NDVI_{noise}$ 进行逐像元统计分析, 并对各月分布值域求和计算其百分比得到 5 a 间 $NDVI_{noise}$ 分布特征。可以看出 5 a 间 $NDVI_{noise}$ 在 0~150%, 噪声存在低于高质量平均值和高于高质量平均值 2 种情况, 其中 1 月和 12 月的 $NDVI_{noise}$ 在 0~25% 分布较广, 分别为 18.74%、

表 2 2001—2005 年各月 $NDVI_{noise}$ 分布占比/%

Table 2 $NDVI_{noise}$ distribution in every month from 2001 to 2005/%

$NDVI_{noise}$	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均值
<-200	0.63	0.63	1.36	2.28	0.93	0.35	0.23	0.16	0.22	0.39	1.33	0.65	0.76
-200~0	1.05	0.98	2.83	6.04	3.09	0.86	0.54	0.19	0.36	1.03	4.56	1.40	1.91
0~25	18.74	15.81	6.01	9.25	4.84	2.30	2.25	3.61	14.56	13.55	8.89	20.73	10.05
25~50	11.97	9.78	6.45	9.84	6.48	5.40	7.51	6.66	12.50	10.91	7.78	8.30	8.63
50~75	17.08	12.16	9.64	12.15	9.45	9.88	17.04	11.91	17.69	16.32	10.66	10.76	12.90
75~100	17.82	17.76	21.26	23.43	22.49	21.64	27.61	17.14	23.50	23.21	16.53	16.28	20.72
100~125	14.37	17.31	23.00	15.67	26.45	25.72	25.86	17.25	15.32	17.97	19.13	17.52	19.63
125~150	7.73	9.85	11.69	8.43	14.07	21.44	12.66	22.55	10.21	10.02	12.97	11.85	12.79
150~175	3.75	5.95	5.82	3.94	4.98	6.82	3.12	10.40	2.64	3.11	6.69	5.45	5.22
175~200	2.21	3.13	3.05	1.99	2.61	2.76	1.26	3.59	0.88	1.13	3.24	2.44	2.36
>200	4.66	6.64	8.88	6.97	4.62	2.83	1.92	6.54	2.13	2.34	8.21	4.61	5.03

注: 加粗数值为该月分布最大占比。

20.73%, 表明 1 月和 12 月 NDVI 值被较大程度削弱了; 2、4、7、9、10 月的 $NDVI_{noise}$ 在 75%~100% 分布较广, 表明这些月份 NDVI 值受到一定削弱; 3、5、6、11 月 $NDVI_{noise}$ 主要集中于 100%~125%, 表明这些月份的 NDVI 值存在一定增益, 8 月 $NDVI_{noise}$ 主要集中于 125%~150%, 表明噪声 NDVI 增益明显。

4.2 重建效果分析评价

1) 视觉效果分析。应用 3 种权重设置方案, 分别利用 TIMESAT3.3.3 软件所提供的 A-G 法、D-L 法、S-G 法重建 2001—2020 年 MODIS NDVI 时间序列数据。以 2001 年 1 月影像为例, 选取噪声区域的原始影像、QA 影像以及 3 种方法重建效果对比情况, 分析不同权重设置方案对重建结果的影响, 具体情况如下图所示。

如图 3 所示, 可以看出: ① 方案一中 3 种方法对原始数据均进行了不同程度的重建, 从重建后影像的平滑度来看, S-G 法>A-G 法>D-L 法; ② 方案二和方案三均进行了有效重建, 表明应用 QA 设置权重, 重建效果优于不设置权重; ③ 与方案三相比, 方案二仅在西部零星区域重建效果略有瑕疵, 表明在 QA 值不连续等于 2 的区域方案二与方案三重

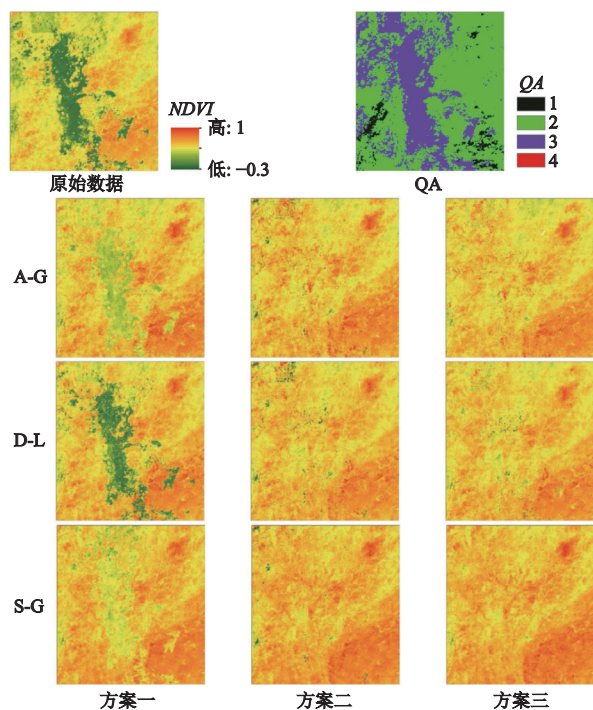


图 3 QA 值不连续等于 2 的区域重建效果对比

Fig.3 Comparison of reconstruction effects in areas with discontinuous QA value equal to 2

建效果较为接近。为进一步分析 QA 值权重设置对重建效果的影响, 选取视觉上平滑度更高的 S-G 法对 QA 连续出现噪声区域的重建效果进行分析, 具体情况如图 4 所示。

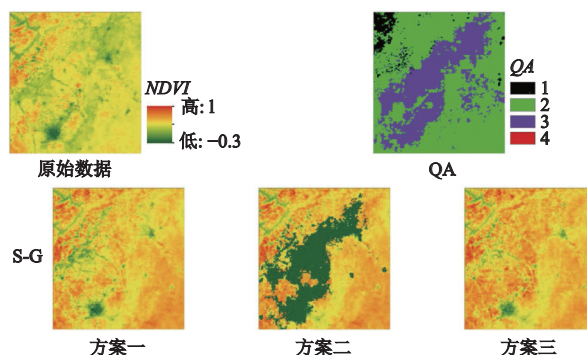


图 4 不同权重方案下 S-G 法在 QA 值连续等于 2 重建效果对比

Fig.4 Comparison of reconstruction effects of S-G method with QA value continuously equal to 2 in different weight

可以看出, ① 方案一和方案三均对噪声区域进行了重建, 方案二在 $QA=2$ 相近区域重建结果为 0, 表明方案二在 QA 连续等于 2 的区域重建效果较差; ② 方案三在方案二重建结果不为 0 的区域与其重建结果一致, 表明 QA 等于 2 或 3 的情况下权重设置为 0 仅影响 QA 连续等于 2 或 3 及其相近区域; ③ 此外, 经对比分析 A-G 法、D-L 法、S-G 法应用方案二权重时均在相同区域重建结果为 0, 表明 3 种重建方法均会受到 2 或 3 权重等于 0 影响。

2) 优质区域的保真性分析。通过叠加分析, 提取长江流域范围内 20 a 来 QA 均等于 0 或 1 的像元为优质区域, 共计 377 150 个, 计算该区域不同权重方案下 3 种重建方法的 R^2 和 RMSE, 分析重建方法对优质区域的保真性, 由于方案二和方案三在 $QA=0$ 和 1 的权重设置以及重建参数一致, 因此 R^2 和 RMSE 计算结果一致, 结果如表 3 所示。

3 种重建方法在不同权重方案情况下 R^2 均大于 0.9 呈显著相关, RMSE 值均小于 0.15, 表明重建结果与原始值差异较小, 同时 R^2 和 RMSE 最大值、最小值、平均值、中位数、标准差趋势相一致, R^2 呈现 A-G>D-L>S-G 的趋势, RMSE 呈现 A-G<D-L<S-G 的趋势。一方面 A-G 法的保真效果最佳, D-L 法略逊于 A-G 法, 保真性较好, S-G 法保真性欠佳; 另一方面 3 种重建方法在不设置权重时的保真性略优于设置权重, 表明加权重建对于保持优质

表 3 不同权重下重建方法对 20 a 间质量较好区域的保真性分析

Table 3 Fidelity analysis of reconstruction methods with different weights for regions with good quality in recent 20 years

重建方法	权重	R^2					RMSE				
		最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差
A-G	方案一	0.9971	0.9150	0.9499	0.9670	0.0375	0.1162	0.0295	0.0243	0.0229	0.0090
	方案二、三	0.9969	0.9143	0.9489	0.9664	0.1040	0.1177	0.0296	0.0245	0.0231	0.0112
D-L	方案一	0.9966	0.9133	0.9481	0.9658	0.0391	0.1285	0.0298	0.0247	0.0235	0.0090
	方案二、三	0.9966	0.913	0.9471	0.9652	0.0402	0.1299	0.0298	0.0249	0.0238	0.0091
S-G	方案一	0.9850	0.8843	0.9059	0.9352	0.0567	0.1380	0.0344	0.0346	0.033	0.0123
	方案二、三	0.9847	0.8817	0.9042	0.9336	0.0738	0.1391	0.0348	0.0349	0.0334	0.0131

注:加粗数值为最佳值。

区域 NDVI 的保真性意义不大。

3)模拟加噪重建效果分析。为了量化研究重建效果,如图 5 所示,本文选用 2001 年逐月 QA=0 或 1 的 NDVI 数据在 2002 年对应的月份 QA=2 或 3 像元的位置,依据 2001—2005 年 $NDVI_{noise}$ 分析的结果对 2001 年的 NDVI 逐月添加噪声,然后应用 3 种方法分别进行重建,通过计算各像元重建后与加噪前的 RMSE 和 R^2 评价重建效果。①参与重建的像元共有 141 684 个,经分析 A-G、D-L、S-G

法中分别有 6 223 个、6 213 个和 1 587 个像元重建后数值异常,没有被有效重建,S-G 法未有效重建像元最少;②剔除未有效重建的像元后进行统计分析(表 4),3 种方法重建后与加噪前的 R^2 平均值均大于 0.8 呈显著相关, RMSE 平均值均小于 0.15,表明 3 种方重建效果均较好;③ S-G 法 R^2 平均值和标准差值最优,分别为 0.861 6 和 0.184 8, RMSE 为 0.003 5~0.441 1,标准差为 0.038 3,重建效果优于 A-G 和 D-L 法。

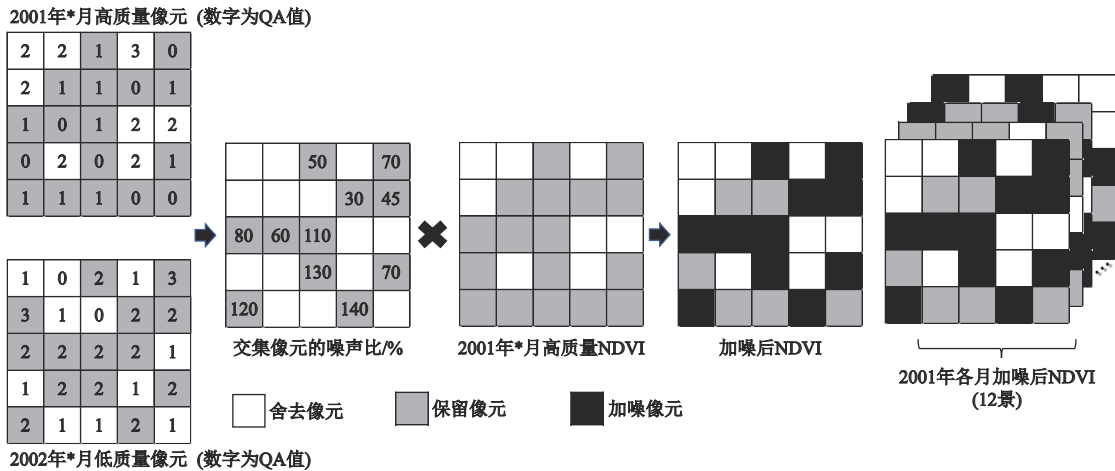


图 5 模拟加噪实验示意图

Fig.5 Map of simulated noise adding experiment

表 4 模拟加噪条件下 3 种方法的重建效果统计

Table 4 Statistical of reconstruction effects of three methods under simulated noise conditions

重建方法	R^2					RMSE				
	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差
A-G	0.9999	-0.8916	0.8520	0.9416	0.2389	0.9832	0.0016	0.0692	0.0547	0.0512
D-L	0.9999	-0.9741	0.8333	0.9278	0.2449	0.9168	0.0016	0.0760	0.0610	0.0534
S-G	0.9983	-0.8987	0.8616	0.9238	0.1848	0.4411	0.0035	0.0714	0.0628	0.0383

注:加粗字体为最佳值。

4.3 20 a 间长江流域植被演变特征

采用重建效果较好的 S-G 法和在不同噪声条件下有良好表现的权重方案三的重建结果, 提取长江流域 2001—2020 年重建后每年 NDVI 的最大合成(MVC)值, 然后计算该影像的平均值代表该年的植被情况, 对 20 a 间的 MVC 平均值进行趋势率和拟合优度分析, 如图 6 所示。20 a 间最大合成的 NDVI 值的趋势率 $k=0.00254$, 趋势率的拟合优度 $R^2=0.84443$, 拟合效果较好, 表明近 20 a 间长江流域的植被指数总体呈持续波动上升的趋势。

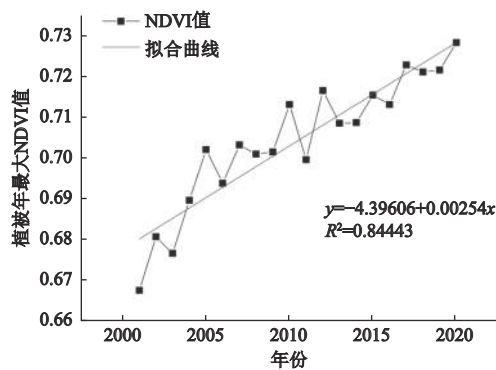


图 6 2001—2020 年长江流域植被年 NDVI 最大值变化
Fig.6 Variation of vegetation NDVI in the Yangtze River Basin in 2001-2020

5 结论与讨论

研究通过计算 QA 的质量频率和 NDVI 噪声比分析长江流域 MODIS NDVI 质量情况, 设计 3 种权重设置方案, 应用 S-G、A-G、D-L 这 3 种重建方法, 对长江流域 2001—2020 年的 MODIS NDVI 数据进行重建, 设计优质区域保真性评价和模拟加噪法对重建效果进行分析评价, 得到以下结论:

1) 长江流域 $QA=2$ 或 3 的区域像元主要分布于西部山脉顶部常年冰雪覆盖区域, 长江、太湖、巢湖、洞庭湖等水域以及四川盆地周围常年云雾覆盖区域。NDVI 随海拔的升高质量越好, 在部分高海拔山脊地区质量又有所下降, 全年噪声比主要集中于 75%~125%, 冬季 $NDVI_{noise}$ 较低, 春秋其次, 夏季最高, 表明长江流域夏季存在一定数量的 NDVI 数值增益, 不宜直接应用最大合成法进行 NDVI 数据处理。

2) 从视觉上来看, 加权 S-G 法重建效果优于 A-G 和 D-L, 在连续噪声的条件下 $QA=2$ 或 3 的权重

设置为 0 会导致重建后数据连片缺失, 与王正兴等在研究重建东南亚地区多云多雨的 NDVI 时应采用宽松权重的论点相一致。

3) NDVI 质量较好的区域的保真性分析结果与前人研究结论相同, A-G 法的保真效果最佳, 其次为 D-L 法, S-G 法保真性欠佳, 重建时不设置权重的保真性优于设置权重; 通过对模拟加噪重建效果的对比显示, A-G、D-L 法重建后丢失像元是 S-G 法的 4 倍左右, 未丢失像元中 S-G 法 R^2 平均值和标准差值最优, 分别为 0.8616 和 0.1848, RMSE 为 0.0035~0.4411, 标准差为 0.0383, 与前人认为 A-G 和 D-L 的保真性优于 S-G 法的研究结果不同, S-G 法在低质区域保真性优于 A-G 和 D-L 法。

长江流域植被茂密、生态系统格局复杂, 研究 QA 质量权重对重建效果的影响, 提升经典重建方法的重建精度, 对长江流域相关生态研究具有一定的应用价值。但还需在不同气候条件、不同植被条件、不同 QA 质量频率等情况下的权重设置方式进行深入分析, 在固定质量权重的基础上空间动态权重的设置也有待进一步探索, 下一步应朝着这两个方向继续深入, 不断提升 NDVI 重建精度。

参考文献(References):

- [1] 马新萍, 白红英, 贺映娜, 等. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1616-1621. [Ma Xinping, Bai Hongying, He Yingna et al. The vegetation remote sensing phenology of Qinling Mountains based on NDVI and its response to temperature: Taking within the territory of Shaanxi as an example. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1616-1621.]
- [2] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 1019-1024. [Gan Chunying, Wang Xizhi, Li Baosheng et al. Change of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024.]
- [3] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 882-888. [Bai Jianjun, Bai Jiantao, Wang Lei. Spatio-temporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi Province in 2000-2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(7): 882-888.]
- [4] 王建国, 张飞. 2000—2019 年新疆植被覆盖度时空格局及重心变化分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 188-194. [Wang Jianguo, Zhang Fei. Spatial-temporal pattern and gravity center change of fractional vegetation cover in Xinjiang, China from 2000 to 2019. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural*

- tural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 188-194.]
- [5] 陈雨思, 李丹, 黎臻, 等. 多时相MODIS影像的黑龙江省水稻种植面积提取[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 201-208. [Chen Yusi, Li Dan, Li Zhen et al. Rice planting area extraction based on multi-temporal MODIS images in Heilongjiang Province of China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 201-208.]
- [6] 刘哲, 汪雪滢, 刘帝佑, 等. 基于MODIS数据的黄淮海夏玉米高温风险空间分布[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 175-181. [Liu Zhe, Wang Xueying, Liu Diyou et al. Spatial distribution of high temperature risk on summer maize in Huang-Huai-Hai Plain based on MODIS data. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 175-181.]
- [7] 耿丽英, 马明国. 长时间序列NDVI数据重建方法比较研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 362-368. [Geng Liying, Ma Mingguo. Advance in method comparison of reconstructing remote sensing time series data sets. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 362-368.]
- [8] Yu Wentao, Li Jing, Liu Qinhuo et al. Gap filling for historical landsat NDVI time series by integrating climate data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 484-505.
- [9] Carlos Granero-Belinchon, Karine Adeline, Aude Lemonsu et al. Phenological dynamics characterization of Alignment Trees with Sentinel-2 Imagery: A vegetation indices time series reconstruction methodology adapted to urban areas[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 1613-1635.
- [10] 李杭燕, 马明国, 谭俊磊. 时序NDVI数据集重建综合方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(6): 891-896. [Li Hangyan, Ma Mingguo, Tan Junlei. Intergrated reconstruction method of time series NDVI Dataset. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(6): 891-896.]
- [11] Suman Kumar Padhee, Subashisa Dutta. Spatio-temporal reconstruction of MODIS NDVI by regional land surface phenology and harmonic analysis of time-series.[J] GIScience & Remote Sensing, 2019, 56(8):1261-1288.
- [12] 朱慧, 李军. 三种时序NDVI重建方法的对比研究——以重庆为例[J]. 山地学报, 2017(6): 919-925. [Zhu Hui, Li Jun. Three timed-series NDVI reconstruction methods: A case study of Chongqing. Mountain Research, 2017(6): 919-925.]
- [13] 马明国, 宋怡, 王旭峰, 等. AVHRR, VEGETATION和MODIS时间系列遥感数据产品现状与应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 663-670. [Ma Mingguo, Song Yi, Wang Xufeng et al. Development status and application research of the Time Series Remote Sensing Data Products based on AVHRR, VEGETATION and MODIS. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(5): 663-670.]
- [14] 周增光, 唐婷. 基于质量权重的Savitzky-Golay时间序列滤波方法[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 232-239. [Zhou Zengguang, Tang Ping. VI-Quality-Based Savitzky-Golay Method for filtering time series data. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(2): 232-239.]
- [15] 程琳琳, 李玉虎, 孙海元, 等. 京津冀MODIS长时序增强型植被指数拟合重建方法适用性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 148-158. [Cheng Linlin, Li Yuhu, Sun Haiyuan et al. Applicability of fitting and reconstruction method of MODIS long-time enhanced vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 148-158.]
- [16] 王正兴, 曹云锋. 东南亚地区2010年MODIS-NDVI再分析数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2017, 1(3): 317-323. [Wang Zhengxing, Cao Yunfeng. Reanalysis dataset on MODIS-NDVI in Southeast Asia, 2010. Journal of Global Change Data & Discovery, 2017, 1(3): 317-323.]
- [17] Tao Jianbin, Wu Wenbin, Zhou Yong et al. Mapping winter wheat using phenological feature of peak before winter on the North China Plain based on time-series MODIS data[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(2): 348-359.
- [18] 卫炜, 吴文斌, 李正国, 等. 时间序列植被指数重构方法对比研究[J]. 中国农业资源与规划, 2014, 35(1): 34-43. [Wei Wei, Wu Wenbin, Li Zhengguo et al. Comparison of three methods for reconstructing time series vegetation index. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(1): 34-43.]
- [19] 张晗, 任志远. 多种时序NDVI重建方法比较与应用分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(15): 2998-3008. [Zhang Han, Ren Zhiyuan. Comparison and application analysis of several NDVI time-series reconstruction methods. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(15): 2998-3008.]
- [20] 熊文, 李志军, 黄羽, 等. 中华人民共和国长江保护法要点解读[M]. 武汉: 长江出版社, 2021. [Xiong Wen, Li Zhijun, Huang Yu et al. Interpretation of key points of the Yangtze River protection law of the People's Republic of China. Wuhan: Changjiang Publishing House, 2021.]
- [21] 彭俊, 凌敏, 俞珊妮, 等. 长江流域径流量变化过程及其对ENSO和PDO的响应[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 515-526. [Peng Jun, Ling Min, Yu Shanni et al. Variation process of water discharge and its response to ENSO and PDO in the Yangtze River Basin. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 515-526.]
- [22] 李军, 朱慧. 重庆地区MODIS/NDVI时间序列数据重建研究[J]. 地理科学, 2017, 37(3): 437-444. [Li Jun, Zhu Hui. The reconstruction of MODIS/NDVI time series data in Chongqing. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(3): 437-444.]
- [23] Lovell J L, Graetz R D. Filtering Pathfinder AVH RR land NDVI data for Australia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(13): 2649-2654.
- [24] 朱慧. 重庆地区NDVI时间序列重建研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017. [Zhu Hui. Study on the reconstruction of NDVI time series data in Chongqing. Chongqing: Chongqing Normal University, 2017.]
- [25] Chen J, Jönsson P, Tamur M et al. A simple method for reconstruct-

ing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golayfilter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 332-344.

[26] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1832.

Evaluation of Reconstruction Effect of NDVI Time Series Based on QA Weight: A Case Study of MODIS NDVI in the Yangtze River Basin

Zhu Hui^{1,2}, Hu Yong^{1,2}, Sun Fen^{1,2}, Wang Qiang^{1,2}, Ma Xueying^{1,2}

- (1. *Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 400020, China;*
2. *Key Laboratory of Monitoring, Evaluation and Early Warning of Territorial Spatial Planning Implementation, Ministry of Natural Resources, Chongqing 400020, China*)

Abstract: In this article, the quality of MODIS NDVI in the Yangtze River Basin is analyzed by calculating the mass frequency and noise ratio. Based on three commonly used reconstruction methods of S-G, A-G and D-L, three quality weight schemes are designed to reconstruct the time series MODIS NDVI data of the Yangtze River Basin from 2001 to 2020. Subsequently, the reconstruction effect is analyzed and evaluated by visual contrast, high-quality regional fidelity as well as simulation denoising. The results show that the annual noise ratio in the Yangtze River Basin is mainly 75%–125%, in which the noise in winter has a great inhibitory effect on NDVI, followed by spring and autumn, and the noise in summer has an increasing effect on NDVI. The S-G method on the basis of the third quality weight scheme exerts the optimal effect on the reconstruction of continuous missing original data. Additionally, in the high-quality region, the fidelity of A-G method is high, and the mean R^2 and RMSE of high-quality pixels are 0.9489 and 0.0245, respectively. Moreover, in the simulation denoising experiment, the S-G method has the least data loss pixels after reconstruction, the average value and standard deviation of the R^2 between the reconstructed data and the original data are 0.8616 and 0.1848 respectively the RMSE is between 0.0035 and 0.4411, and the standard deviation is 0.0383, indicating that the fidelity of the S-G method is higher in the low-quality area.

Key words: NDVI time series reconstruction; the Yangtze River Basin; QA weight; Savitzky-Golay