

Doi: 10.20062/j.cnki.CN 37-1453/N.2024.03.001

大气校正对滨海湿地 Sentinel-2 影像 NDVI 的影响

刘言智¹ 苏博² 王雪宏¹ 周洁¹ 栗云召¹ 于君宝¹ 管博¹ 宋秀凯²

(1.鲁东大学 滨海生态高等研究院,山东 烟台 264039;

2.山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室,山东 烟台 264006)

摘要:为消除卫星影像成像过程中受到的大气干扰,还原真实的地物反射率,大气校正已成为定量遥感分析研究中的关键环节。本文基于2018—2022年间5期黄河三角洲的Sentinel-2影像,通过对比分析大气校正前后的NDVI值,探究大气校正对NDVI计算的必要性。结果发现:(1)大气校正能够对滨海湿地Sentinel-2影像的整体NDVI和不同地类NDVI均产生显著影响,但对不同年份黄河NDVI的影响存在不确定性;(2)大气校正前后NDVI在不同地类间波谱特征变化无较大差异,但大气校正有效增强NDVI极差范围,提高了不同地类NDVI区分度。该研究为大气校正对NDVI存在影响的相关研究提供了参考依据。

关键词:大气校正;滨海湿地;Sentinel-2影像;NDVI;黄河三角洲

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2024)03-0193-08

卫星影像在成像过程中受到大气干扰,这使得影像像元的辐射信息无法真实反映地物信息,从而削弱了影像的对比度,因此,有效消除大气对卫星载荷入瞳信号影响、还原真实地表信息、改善影像质量的大气校正是定量遥感研究中不可或缺的一环^[1-2]。随着高分辨率光学卫星技术的广泛应用,定量遥感的使用范围和研究场景也在不断扩大^[3]。作为植被覆盖度估算方法中最常见、最经典的植被指数,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)在量化应用场景中一般依赖于影像大气校正的结果^[4]。

甘文霞等^[5]认为大气校正之后NDVI值具有不同程度的提升,可区分性有所提高,且在时间波动趋势上相较于校正前趋于平稳。程东亚等^[6]发现大气校正前后山地流域NDVI受空间分布和地形差异影响所产生的变化误差具有规律性。Moravec等^[7]基于Landsat-8、Sentinel-2和无人机影像,比较了多种大气校正模型对NDVI的影响,结果显示不同的校正模型使影像近红外、红光波段的中位数发生不同改变,从而影响NDVI结果。李海翠等^[8]认为Sen2cor工具集对Sentinel-2数据大气校正的整体效果优于6S、FLAASH、ACOLITE和QUAC等模型。Bui等^[9]发现在高植

被覆盖度的情况下,运用Sen2cor大气校正工具集校正后的影像能更好地表达地物信息特征。综合来看,以上研究主要聚焦不同大气校正方法对影像定量分析的影响,并且表明大气校正对影像处理分析有显著影响,但少有研究阐述大气校正前后NDVI变化的具体差异。

滨海湿地位于海陆交互地带,区域内地表覆盖类型繁多,植被覆盖程度差异大,是重要的生态环境保护区域^[10-11]。近年来, Sentinel-2影像因其具有较高的空间分辨率与时间分辨率被广泛应用在滨海湿地地表覆被的研究中,但关于大气校正前后滨海湿地NDVI变化的研究比较匮乏。因此,以我国黄河三角洲滨海湿地为例,从统计学分析和波谱特征分析入手,探究基于Sentinel-2影像大气校正前后研究区整体NDVI与细分地类NDVI的变化特征,明晰大气校正对NDVI计算的必要性。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河三角洲(37°34'16"N~38°16'5"N, 118°31'6"E~119°23'52"E)位于黄河现行河道入海尾间处(山

收稿日期:2023-12-12;修回日期:2024-04-05

基金项目:国家自然科学基金—山东联合基金(U2006215);国家自然科学基金(42171111)

通信作者简介:栗云召(1985—),男,副教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为湿地生态过程。E-mail:liyunzhao007@163.com

山东省东营市) ,分布着我国暖温带最为完整的滨海湿地生态系统(图1)。湿地典型植物有芦苇(*Phragmites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)^[12]。地表覆被类型可分为中、高植被覆盖区(植被覆盖度 $\geq 30\%$)、低植被覆盖区及裸地(植被覆盖度 $< 30\%$)、水体覆盖区三大类,其中水体覆盖区因化学组成和悬浮物含量的差异又

细分为黄河、海洋、陆地水体等类型。研究区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温为 $12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量为 551.6 mm ,降水季节性明显且主要集中在下半年,尤其是7—9月份。多云现象使研究区遥感影像云量较高,影响影像地物反射率反演及地表覆被判读。

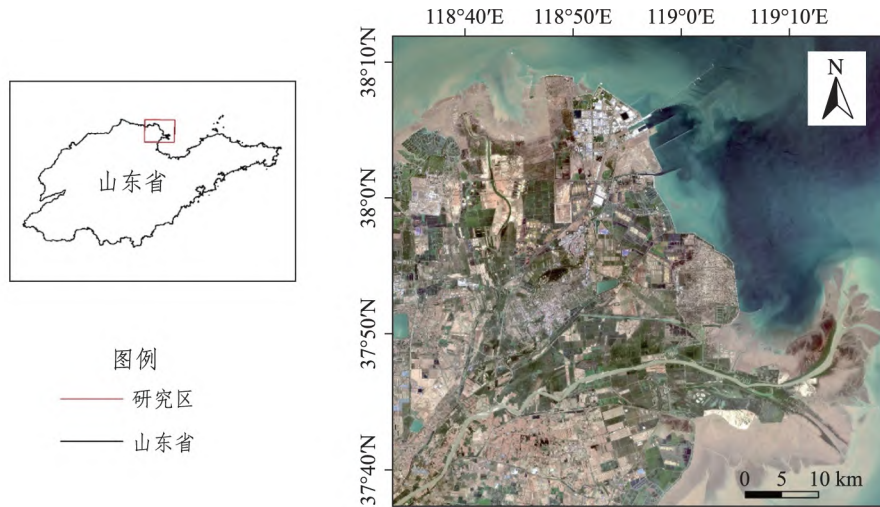


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Schematic location of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 数据源及预处理

本研究数据主要来源于 Sentinel-2 卫星影像。选取了研究区 2018—2022 年植被生长季期间 5 期 10 幅(表1) Sentinel-2 卫星 Level 1C 数据产品(<https://www.copernicus.eu/en/access-data>)并运用 Sen2cor 大气校正工具集对选取的遥感影像进行处理,得到了相应的 10 幅 Level 2A 级数据产品。对上述两类数据进行影像镶嵌和裁剪处理,分别提取研究区的大气表观反射率(top of atmosphere reflectance, TOA)数据和大气底端反射率(bottom of atmosphere reflectance, BOA)数据。

为验证大气校正后 NDVI 的可靠性,选用 MODIS 陆地 2 级标准数据 MOD13Q1 对其进行检验。该数据集在生态、环境和农业等领域广泛应用,其中包含陆域 NDVI 产品,其空间分辨率为 250 m ,时间分辨率为 16 d 。此外,辅助分析数据包括水利部黄河水利委员会提供的东营市利津水文站水情日报、国家气象中心提供的东营市天气信息。

表1 研究选用的 Sentinel-2 影像

Tab.1 Sentinel-2 imagings selected for the study

成像日期	产品等级	拼接域编号	云量/%
2018-06-01	Level 1C	T50SPG	0.01
		T50SPH	0.00
	Level 2A	T50SPG	0.01
		T50SPH	0.00
2019-06-26	Level 1C	T50SPG	0.84
		T50SPH	2.34
	Level 2A	T50SPG	0.84
		T50SPH	2.34
2020-07-20	Level 1C	T50SPG	0.01
		T50SPH	0.00
	Level 2A	T50SPG	0.01
		T50SPH	0.00
2021-06-05	Level 1C	T50SPG	0.00
		T50SPH	0.00
	Level 2A	T50SPG	0.00
		T50SPH	0.00
2022-06-20	Level 1C	T50SPG	0.00
		T50SPH	0.24
	Level 2A	T50SPG	0.00
		T50SPH	0.24

1.2.2 大气校正方法

采用 Sen2cor 工具集对 Sentinel-2 影像进行大气校正处理。首先,将 Level 1C 数据作为输入

参数导入至工具集中,根据阈值测试结果对影像进行场景分类,共有12种不同的分区类型,其中包含非植被区、植被区和水体3种类型。其次,采用基于大气辐射传输理论构建的libRadtran模型进行大气校正,通过模型内置的查找表所包含的大气条件、太阳角度、地形、4种基本气溶胶类型(农村、城市、沙漠和海洋)以及6种不同的臭氧含量类别,自动选择具体参数,进而消除大气对图像的影响。最后,结合Sen2cor自带的SRTM数字高程模型,改进云边界内部水体像元错误分类的倾向,对地形和云阴影像元进行正确区分,生成能反映大气底端反射率的Level 2A数据产品^[13-14]。

1.2.3 NDVI 计算方法

利用Sentinel-2影像近红外波段和红光波段计算NDVI值,计算公式为

$$\rho_{\text{NDVI}} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}}, \quad (1)$$

式中: ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别为近红外波段和红光波段的像素值,Sentinel-2影像中近红外波段为第8波段,红光波段为第4波段; ρ_{NDVI} 的取值范围为[-1,1]。

1.2.4 地物类型分类及样本点选取

为探究不同地类大气校正前后NDVI的变化情况及差异,基于NDVI数据和实地调查样本,采用面向对象的监督分类方法(K-nearest neighbor)对研究区地物类型进行划分。地类包含低植被区(含裸地)、高植被区、黄河、海洋及陆地水体5类,2018—2022年地类总体分类精度分别为87.72%、89.93%、88.81%、90.24%、89.36%。

采用ArcGIS中的Create Random Points工具,在研究区内随机选取5000个样点,不同地类的样点数量见表2。

表2 2018—2022年不同地类样点数量

Tab.2 The number of sample sites of different land types from 2018 to 2022

年份	低植被区	高植被区	黄河	海洋	陆地水体	总计
2018	1550	675	40	2338	397	5000
2019	1385	720	35	2377	483	5000
2020	1269	833	57	2360	481	5000
2021	1648	452	41	2390	469	5000
2022	1592	531	34	2389	454	5000

1.2.5 分析方法

1) 大气校正后 NDVI 可靠性检验方法

选用与每期影像时间重叠的MODIS数据产品对大气校正后NDVI结果进行可靠性检验,运用谷歌地球引擎(GEE)提取MOD13Q1数据中NDVI结果进行检验。由于该数据只包含陆域部分,因此以验证数据作为掩膜,裁剪大气校正后NDVI结果,并将空间分辨率重采样至250 m,使结果与验证数据在范围和分辨率上保持一致。通过已生成样本点提取对应像元NDVI值,建立回归曲线,并分析变化趋势,进而评价两组数据之间的相关性,最终确认大气校正后NDVI的可靠性。

2) 大气校正前后 NDVI 的统计学分析

运用统计学分析方法,分析大气校正前后NDVI差异,具体分析内容如下:

(1) 比较大气校正前后NDVI整体差异性,采用配对样本 t 检验;

(2) 比较不同地类大气校正前后NDVI的差异性,采用配对样本 t 检验;

(3) 比较不同年份各地类间大气校正前后NDVI差值的差异性,采用单因素方差分析,对有显著差异的结果采用Bonferroni法进行事后检验分析^[15]。

3) 大气校正前后 NDVI 的波谱特征分析

计算大气校正前后不同地类红光波段、近红外波段和NDVI结果的样本点均值,构建波谱特征图,通过对比差异分析大气校正前后NDVI的变化特征及变化原因。

2 结果分析

2.1 大气校正后 NDVI 可靠性检验结果分析

通过生成随机样本点提取2018—2022年大气校正后Sentinel-2影像计算的NDVI值和同期MOD13Q1提供的NDVI值,建立回归曲线,见图2。由图2分析结果显示:5期基于大气校正后Sentinel-2影像计算的NDVI结果与验证数据的NDVI结果呈正相关性,回归曲线的斜率接近1,表明数据间相关性较强。因此,计算数据与验证数据的NDVI空间趋势总体相近,说明运用Sen2cor模型校正后的NDVI数据具有可靠性。

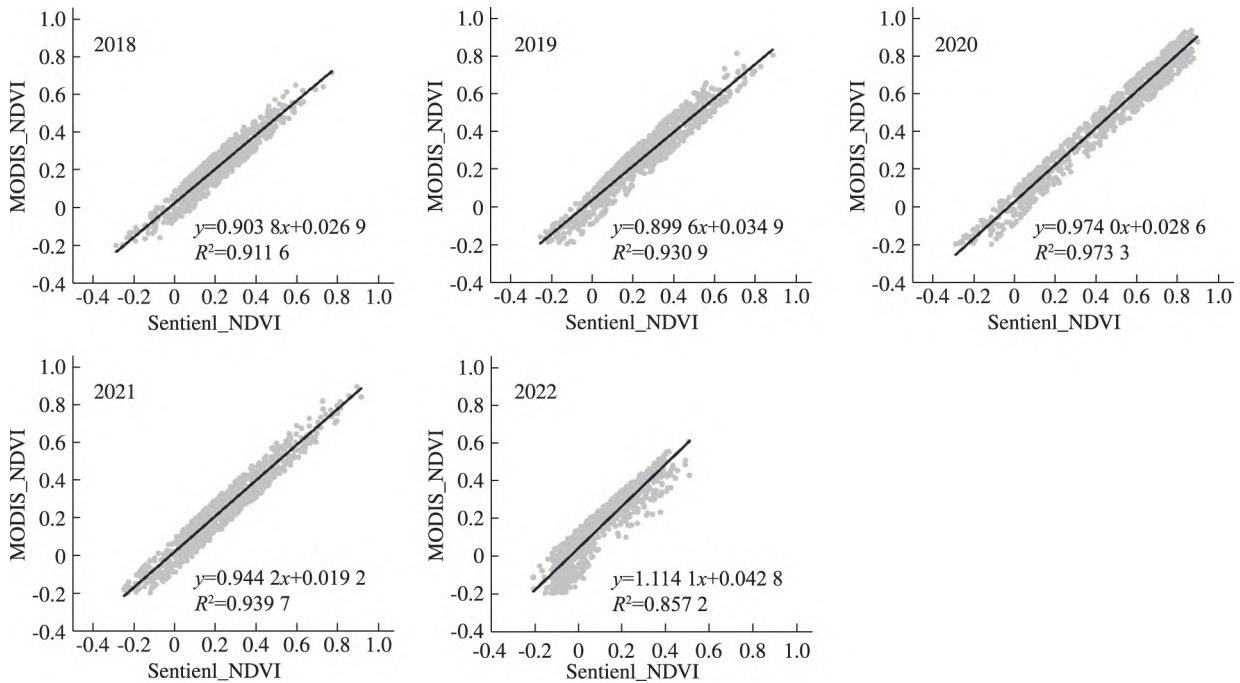


图 2 2018—2022 年计算数据与验证数据的 NDVI 分布趋势

Fig.2 NDVI distribution trends of calculated data versus validated data from 2018 to 2022

2.2 大气校正前后 NDVI 整体差异性分析

根据式(1)对大气校正前后影像进行计算,分别统计 NDVI 的最小值、最大值、均值与极差,得到表 3。由表 3 可见:相较于大气校正前,大气校正后 NDVI 的最小值平均下降 0.256 6,最大值平均增加 0.154 4,极差范围变大,增强了不同地类 NDVI 的对比度,且各均值有所提高;此外,变化幅度最大的影像年份为 2019 年。

表 3 2018—2022 年大气校正前后 NDVI 特征
Tab.3 NDVI characteristics before and after atmospheric correction from 2018 to 2022

年份	数据类型	最小值	最大值	均值	极差
2018	TOA	-0.526 6	0.792 8	-0.078 5	1.319 5
	BOA	-0.995 6	0.977 1	-0.054 2	1.972 7
2019	TOA	-0.515 3	0.778 3	-0.042 0	1.293 6
	BOA	-0.980 4	0.981 4	-0.020 3	1.961 8
2020	TOA	-0.524 6	0.778 5	-0.045 8	1.303 2
	BOA	-0.603 3	0.904 5	-0.011 1	1.507 8
2021	TOA	-0.617 8	0.813 2	-0.101 6	1.431 1
	BOA	-0.864 1	0.955 9	-0.079 1	1.820 0
2022	TOA	-0.207 8	0.389 4	-0.018 3	0.597 3
	BOA	-0.231 7	0.505 1	0.005 9	0.736 9

对样本整体进行配对样本 *t* 检验 结果如图 3(a) 所示。大气校正后 NDVI 结果均出现增长,其中:由 TOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.078 5±0.004 0、-

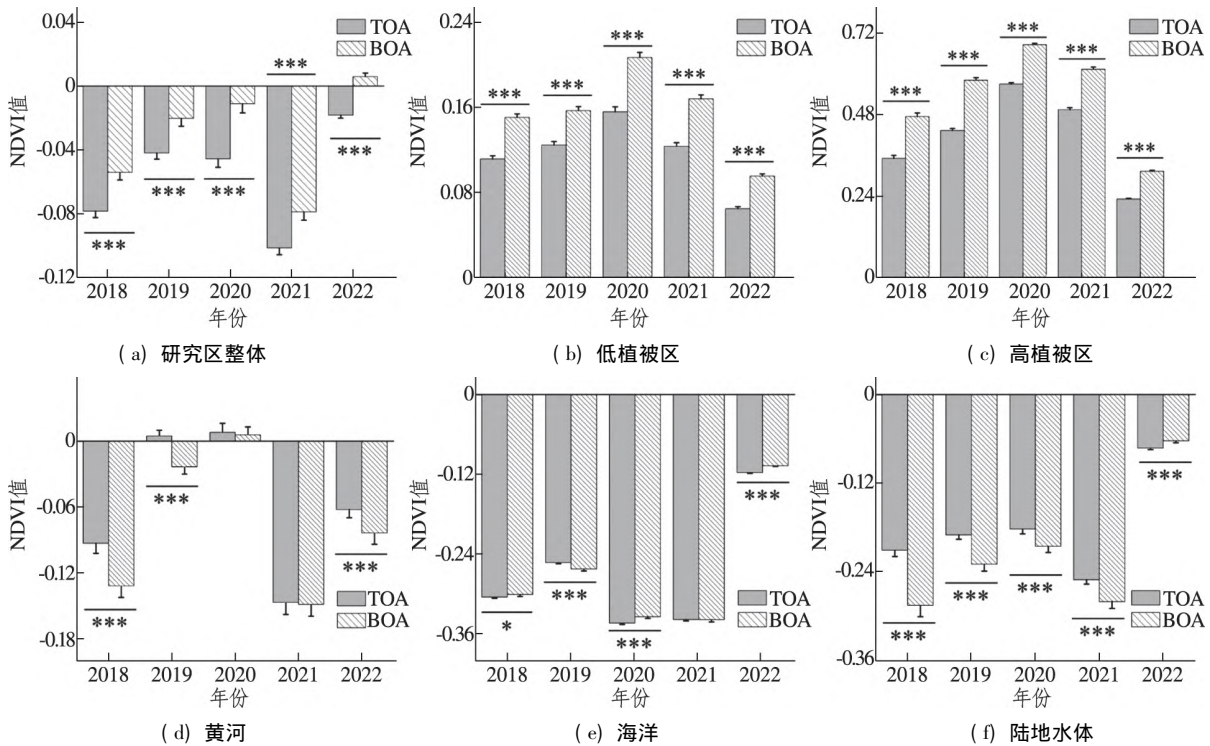
0.042 0±0.003 9、-0.045 8±0.005 2、-0.101 6±0.004 3、-0.018 3±0.001 8; 由 BOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.054 2±0.004 8、-0.020 3±0.004 9、-0.011 1±0.005 8、-0.079 1±0.005 0、0.005 9±0.002 2。差异性比较结果表明:分别由 TOA 和 BOA 数据测算出的 NDVI 均存在极显著统计学差异($P<0.001$)。

2.3 不同地类大气校正前后 NDVI 差异性分析

对不同地类大气校正前后 NDVI 差异性进行分析 得到图 3(b)~(f)。

由图 3(b)、(c) 可见,低植被区和高植被区对应的大气校正后 NDVI 值均出现增长。差异性比较结果表明:在低植被区和高植被区中,分别由 TOA 和 BOA 数据测算出的 NDVI 值均存在极显著统计学差异($P<0.001$)。

由图 3(d) 可见,黄河区域大气校正后 NDVI 值均出现下降,其中:由 TOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.093 0±0.009 1、0.004 8±0.005 2、0.008 0±0.008 3、-0.146 9±0.011 1、-0.062 2±0.007 5; 由 BOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.131 9±0.010 4、-0.023 3±0.006 7、0.005 8±0.007 3、-0.148 7±0.010 7、-0.083 7±0.010 2。差异性比较结果表明:2020、2021 年黄河 NDVI 差异性不显著($P>0.05$),而其他年份差异性显著($P<0.001$)。



注: * 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$, *** 代表 $P < 0.001$ 。

图 3 2018—2022 年大气校正前后 NDVI 变化

Fig.3 NDVI changes before and after atmospheric correction from 2018 to 2022

海洋区域大气校正后 NDVI 变化相对复杂 (见图 3(e)), 2018、2020 和 2022 年出现小幅度上升, 2019 和 2021 年下降, 其中: 由 TOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.3056 ± 0.0018 、 -0.2536 ± 0.0016 、 -0.3449 ± 0.0018 、 -0.3394 ± 0.0021 、 -0.1180 ± 0.0008 ; 由 BOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.3017 ± 0.0029 、 -0.2631 ± 0.0030 、 -0.3351 ± 0.0025 、 -0.3396 ± 0.0035 、 -0.1075 ± 0.0010 。差异性比较结果表明: 除 2021 年外, 其他年份根据 TOA 数据测算出的结果与 BOA 数据测算结果差异性显著 ($P < 0.05$)。

如图 3(f) 所示, 陆地水体区域大气校正后 NDVI 值大致呈下降趋势, 其中: 由 TOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.2115 ± 0.0085 、 -0.1907 ± 0.0058 、 -0.1827 ± 0.0066 、 -0.2515 ± 0.0060 、 -0.0727 ± 0.0021 ; 由 BOA 数据计算出的 NDVI 值分别为 -0.2863 ± 0.0153 、 -0.2304 ± 0.0094 、 -0.2062 ± 0.0083 、 -0.2812 ± 0.0093 、 -0.0629 ± 0.0025 。差异性比较结果表明: 2018—2022 年分别由 TOA 和 BOA 数据测算出的陆地水体 NDVI 值均存在极显著统计学差异 ($P < 0.001$)。

综合以上分析, 由于 5 期影像时相不同, NDVI 在不同年份均存在波动, 但仍能够反映大气校正前后 NDVI 的统计学差异。总体来看, 在陆地(低植被区、高植被区)大气校正后 NDVI 结果增大, 水体区域(黄河、海洋、陆地水体)则呈现相反趋势。

2.4 各地类间大气校正前后 NDVI 差值的差异性分析

单因素方差分析结果(表 4)表明: 2018—2022 年间, 不同地类间大气校正前后 NDVI 变化幅度存在统计学差异 ($P < 0.05$)。采用 Bonferroni 法进行事后两两比较发现: 低植被区与高植被区较其他地类间均存在统计学差异 ($P < 0.001$); 与海洋比较, 黄河仅 2018 和 2022 年存在统计学差异 ($P < 0.05$); 与陆地水体比较, 黄河除 2019 年外均存在统计学差异 ($P < 0.05$); 与陆地水体比较, 海洋除 2022 年外均存在统计学差异 ($P < 0.05$)。

综合以上分析, 大气校正对不同地类、不同时相 NDVI 结果的影响具有统计学差异, 尤其对不同类型水体的影响各不相同。

表 4 2018—2022 年各地类间大气校正前后 NDVI 差值

Tab.4 NDVI difference values before and after atmospheric correction between land classes from 2018 to 2022

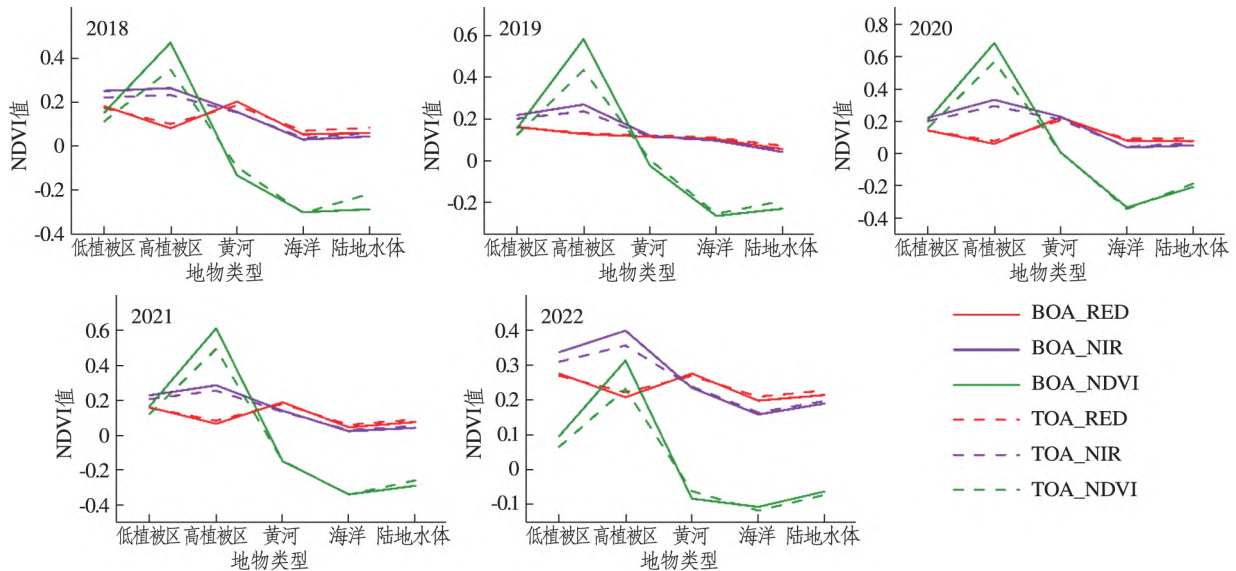
年份	低植被区	高植被区	黄河	海洋	陆地水体	P 值
2018	0.039 1±0.032 8	0.122 9±0.078 7 ^a	0.038 9±0.047 3 ^{ab}	0.003 9±0.054 0 ^{abc}	0.074 8±0.194 6 ^{abcd}	<0.001
2019	0.032 3±0.031 6	0.148 3±0.057 1 ^a	0.028 1±0.016 3 ^{ab}	0.009 5±0.096 1 ^{ab}	0.039 7±0.124 4 ^{abd}	<0.001
2020	0.051 2±0.059 8	0.116 3±0.045 9 ^a	0.002 3±0.048 9 ^{ab}	0.009 8±0.039 6 ^{ab}	0.023 5±0.103 6 ^{abcd}	<0.001
2021	0.044 5±0.030 3	0.119 2±0.038 8 ^a	0.001 8±0.029 2 ^{ab}	0.000 2±0.084 3 ^{ab}	0.029 6±0.108 7 ^{abcd}	<0.001
2022	0.030 6±0.018 4	0.081 5±0.016 4 ^a	0.021 5±0.027 3 ^{ab}	0.010 5±0.012 6 ^{abc}	0.009 8±0.015 8 ^{abc}	<0.001

注: a 表示与低植被区比较 $P < 0.05$; b 表示与高植被区比较 $P < 0.05$; c 表示与黄河比较 $P < 0.05$; d 表示与海洋比较 $P < 0.05$ 。

2.5 大气校正前后 NDVI 的波谱特征变化

分析大气校正前后红光波段、近红外波段和 NDVI 的波谱特征,其变化情况如图 4 所示。总体来看,红光波段和近红外波段在大气校正前后反射率变化幅度相对较小,通过差分运算得到的 NDVI 变化幅度相对较大。红光波段在低植被区反射率相对较高,且在大气校正前后变化不显著;在高植被区反射率均呈现下降状态,大气校正后反射率下降更为明显;黄河区域的红光波段反射

率显著上升,BOA 数据略高于 TOA 数据;而海洋和陆地水体表现相反,且两组数据在陆地水体的差异大于海洋。近红外波段在 5 种地类中呈现出先上升后下降再略微上升的整体趋势。大气校正后,近红外波段反射率在低植被区和高植被区增高,在黄河区域无明显变化,在海洋和陆地水体区域下降。总之,受红光波段和近红外波段变化的影响,大气校正后的 NDVI 值在低植被区存在明显增幅,高植被区增幅更为强烈,黄河和陆地水体表现出下降态势,海洋则变化不明显。



注: BOA 为大气校正后数据,TOA 为大气校正前数据;RED 为红光波段,NIR 为近红外波段,NDVI 代表归一化植被指数值。

图 4 不同地类大气校正前后波谱特征变化

Fig.4 Changes of spectral characteristics before and after atmospheric correction for different land classes

3 讨论

3.1 大气校正对 NDVI 的影响

大气校正后,NDVI 整体极差范围变大,表明大气校正正在消除大气中的散射和吸收效应后,加强了 NDVI 之间的差异,增强了对比度,强化了 NDVI 的表现力,能够更好地实现数据的分等定

级,这与孟庆辉等^[16]运用 Sen2cor 大气校正模型的结果一致。BOA 数据的 NDVI 平均值均大于 TOA 数据结果,潘嫄嫄等^[17]关于 Sentinel-2 影像的研究表明,大气校正后可见光通道反射率变小,而近红外波段由于大气校正弥补了被水汽吸收的辐射,使得其反射率显著增加了 94.21%。由式(1)可知,近红外波段像素值提高,红光波段像素值降低,则 NDVI 的计算结果将增大,因此能够有效加强植被与非植被地物的可区分度。

将研究区分为陆地和水体, 陆地上的低植被区和高植被区 NDVI 也表现出与整体同样的特征, 因此在后续植被指数的提取和应用研究中, 需要考虑大气效应对 NDVI 结果的影响。而黄河、海洋和陆地水体等大多呈现出大气校正后 NDVI 结果小于大气校正前的趋势, 这主要是由于水体在红光波段和近红外波段存在明显吸收, 且波长越长吸收效果越明显, 大气校正剔除了瑞利散射影响, 补偿了水汽强吸收导致的光谱衰减, 进一步还原了不同地物对电磁波的吸收和反射效果, 因而水体的 NDVI 值呈现出大气校正前大于大气校正后的效果, 这与徐春燕等^[4]的研究结果一致。随着水体的浑浊度上升, 其遥感光谱反射率随悬浮沙含量的增长变化明显, 并且近红外波段与红光波段反射率的差值在缩小^[18], 黄河 NDVI 平均值在大气校正前后均大于海洋与陆地水体的平均值, 通过对比 3 种水体的红光波段与近红外波段值, 发现两波段在黄河的反射率均高于海洋和陆地水体, 更接近低植被区的反射效果; 同时杨存建等^[19]研究表明在红光波段, 居民地比林地的亮度值高 10, 而在近红外波段, 居民地比林地的亮度值低 20, 因此低植被区近红外波段与红光波段差值的绝对值小, 这与高浑浊水体的表现一致, 说明富含泥沙且水体浑浊的黄河同时具备水体和低植被区域的反射率特征。因此, 在研究黄河三角洲甚至黄河流域的定量遥感反演中, 不应将黄河简单归类为水体, 将其单独进行区分更合理; 并且由于黄河大气校正前后的 NDVI 变化差异性不确定, 考虑到 NDVI 并不适用于水体的提取, 因此其结果并不会对植被覆盖的提取造成影响。水体的表观光学特性因受到水中成分的影响, 具有随着观测几何、风速和风向等环境光场条件的变化而变化的光学特性^[20], 因而陆地水体和海洋的 NDVI 值也存在着差异, 这也是本研究将这两类不同水体进行区分的主要原因。

各地类间大气校正前后 NDVI 差值具有显著差异性, 主要因为地物自身对不同光谱波段的反射率不同, 而大气校正正在消除大气对光谱的吸收和散射后, 会增强地物对特定光谱波段的吸收和反射, 因此各地类间大气校正前后 NDVI 差值变化不具有相似性^[21-22]。从水的化学角度分析, 陆地水体与黄河为淡水, 海洋为咸水, 两者的无机环境相差大, 因此在进行大气校正后陆地水体与海洋的 NDVI 差值存在差异, 而黄河与海洋之间差

异性不确定的原因可能是由于颗粒物浓度、悬浮物量等不同引起^[23-24]。

3.2 异质性分析

2019 年影像中红光波段在黄河的反射率与其他时期的表现不一致。从统计分析的结果来看, 大气校正前后黄河 NDVI 变化差异存在不确定性, 并且通过分析成像当日黄河水沙情况(表 5)发现, 2019 年影像成像当日黄河流量最大, 说明此时黄河水体特征明显, 因此红光波段在反射率上弱于其他影像。引起 2020、2021 年黄河大气校正前后 NDVI 变化差异不显著的因素可能是成像当日河道来沙系数相对较高, 大气校正未能对该区域红光波段和近红外波段反射率产生较大影响, 因此 NDVI 变化差异不显著。

表 5 影像成像当日黄河水文和温度信息
Tab.5 Hydrologic and temperature information of the Yellow River for the day of imaging

成像日期	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	含沙量/ ($kg \cdot m^{-3}$)	河道来 沙系数	最高 气温/ $^{\circ}C$	最低 气温/ $^{\circ}C$
2018-06-01	1650	4.70	0.002 8	33	17
2019-06-26	1850	10.10	0.005 5	30	22
2020-07-20	1720	13.30	0.007 7	33	22
2021-06-05	1330	4.77	0.003 6	31	19
2022-06-20	387	0.70	0.001 8	37	25

注: 黄河水文信息来自东营市利津水文站。

综合分析波谱特征和成像当日当地气温情况发现, 2022 年 NDVI 年际变化差异较大, 且与验证数据的相关性强度弱于其他年份, 主要原因是红光波段和近红外波段反射率异常上升。对比成像当日的天气情况, 2022 年 6 月 20 日, 最高气温和最低气温都远高于其他时相, 而太阳辐射强度是影响气温的重要因素之一, 一般情况下两者呈较强的正相关性^[25]。同一地区, 相同季节, 温度越高, 太阳辐射强度越强^[26], 从而加大地物的地表反射率, 因此该日影像的红光波段和近红外波段反射率更高, 进而影响了该日的 NDVI 结果, 但由于影响反射率的原因较多, 因此该结果后期还需进一步论证。

4 结论

本文在大气校正理论研究的基础上, 基于 Sen2cor 工具集对 Sentinel-2 卫星影像进行了大气校正, 验证了大气校正后 NDVI 的可靠性, 并对比了校正前后的差异, 得到以下结论:

1) 大气校正能够对滨海湿地 Sentinel-2 影像的整体 NDVI 产生显著影响,也能够对不同地类的 NDVI 产生显著影响,但对黄河 NDVI 的影响存在不确定性;

2) 大气校正前后 NDVI 结果在不同地类间波谱特征变化无较大差异,但大气校正有效增强 NDVI 极差范围,因此提高了不同地类 NDVI 区分度。

因此,由大气影响所造成的辐射误差会对滨海湿地 Sentinel-2 影像 NDVI 产生显著影响,尤其在非水体的地表覆被研究区域,通过大气校正能有效纠正辐射误差,增强了 NDVI 数据的可靠性。

参考文献:

- [1] 郑伟,曾志远.遥感图像大气校正方法综述[J].遥感信息,2004(4):66-70.
- [2] HILL V J,ZIMMERMAN R C,BISSETT P,et al.Impact of atmospheric correction on classification and quantification of seagrass density from WorldView-2 imagery[J].Remote Sensing,2023,15(19):4715.
- [3] 梁顺林,白瑞,陈晓娜,等.2019年中国陆表定量遥感发展综述[J].遥感学报,2020,24(6):618-671.
- [4] 徐春燕,冯学智.TM 图像大气校正及其对地物光谱响应特征的影响分析[J].南京大学学报(自然科学版),2007(3):309-317.
- [5] 甘文霞,沈焕锋,张良培,等.采用 6S 模型的多时相 MODIS 植被指数 NDVI 归一化方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(3):300-304.
- [6] 程东亚,李旭东.大气校正前后山地流域 NDVI 变化特征对比[J].国土资源遥感,2020,32(1):90-97.
- [7] MORAVEC D,KOMÁREK J,LÓPEZ-CUERVO MEDINA S,et al.Effect of atmospheric corrections on NDVI: inter-comparability of Landsat 8,Sentinel-2, and UAV sensors[J].Remote Sensing,2021,13(18):3550.
- [8] 李海翠,况润元,宋子豪.基于 Sentinel-2 影像的鄱阳湖大气校正方法适用性评价[J].航天返回与遥感,2021,42(4):108-119.
- [9] BUI Q T,JAMET C,VANTREPOTTE V,et al.Evaluation of Sentinel-2/MSI atmospheric correction algorithms over two contrasted french coastal waters[J].Remote Sensing,2022,14(5):1099.
- [10] GUAN B,CHEN M,ELSEY-QUIRK T,et al.Soil seed bank and vegetation differences following channel diversion in the Yellow River Delta[J].Science of The Total Environment,2019,693:133600.
- [11] 巴旗,吴振,张诗然,等.黄河口湿地植被时空变化及其影响因素[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(12):81-94.
- [12] 宋红丽,牟晓杰,刘兴土.人为干扰活动对黄河三角洲滨海湿地典型植被生长的影响[J].生态环境学报,2019,28(12):2307-2314.
- [13] 苏伟,张明政,蒋坤萍,等.Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法[J].光学学报,2018,38(1):322-331.
- [14] MUELLER-WILM U.Sen2Cor configuration and user manual[EB/OL].(2019-02-05)[2023-12-01].<https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.8.0/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.8.pdf>.
- [15] 孙艳杰,曹琼,黄佳芳,等.河口沼泽湿地转化为养殖塘对湿地土壤有机碳不同组分含量的影响[J].环境科学学报,2023,43(8):352-361.
- [16] 孟庆辉,李悦铭,王祥,等.基于 Sentinel-2 数据的近岸高悬沙水体漂浮绿潮遥感识别[J].海洋环境科学,2022,41(6):904-909.
- [17] 潘媛媛,李长春,马潇潇,等.Sentinel-2A 卫星大气校正方法及校正效果[J].遥感信息,2018,33(5):41-48.
- [18] 樊辉,黄海军,唐军武.黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测[J].武汉大学学报(信息科学版),2007(7):601-604.
- [19] 杨存建,周成虎.TM 影像的居民地信息提取方法研究[J].遥感学报,2000(2):146-150.
- [20] 韩泽莹.基于多角度传感器的近岸/内陆水域 BRDF 与 AOD 联合反演研究[D].北京:中国科学院大学,2022.
- [21] CARMON N,THOMPSON D R,BOHN N,et al.Uncertainty quantification for a global imaging spectroscopy surface composition investigation[J].Remote Sensing of Environment,2020,251:112038.
- [22] 张亚梅.地物反射波谱特征及高光谱成像遥感[J].光电技术应用,2008(5):6-11.
- [23] DU Y,SONG K,LIU G.Monitoring optical variability in complex inland waters using satellite remote sensing data[J].Remote Sensing,2022,14(8):1910.
- [24] WEI J,WANG M,MIKELSONS K,et al.Global satellite water classification data products over oceanic,coastal, and inland waters[J].Remote Sensing of Environment,2022,282:113233.
- [25] 保广裕,张静,周丹,等.青海省太阳辐射强度时空变化特征分析[J].冰川冻土,2017,39(3):563-571.
- [26] 高婷,沈润平,李磊,等.基于 MODIS 数据地表反照率时空变化特征及影响因子研究[J].气候与环境研究,2021,26(6):648-662.

(下转第 209 页)

of the sediment model setting in the Yellow River. On this basis, three sets of runoff and sediment working conditions were set up to predict the erosion and siltation changes in the waters near the Yellow River estuary from 2023 to 2030. The results are as follows. Under the conditions of the minimum runoff and sediment transport of the Yellow River for many years, there is a small amount of erosion in the Yellow River estuary, the northeast of the Yellow River Delta is basically balanced in scouring and silting, and a small amount of erosion is in the old Yellow River estuary. Under the conditions of multi-year average runoff and sediment transport, there is about 3 m of siltation in the north-northeast direction of the Yellow River estuary, and the Yellow River estuary and the old Yellow River estuary continue to scour, and the most serious part is about 3 m. Under the condition of 85% of the runoff and sediment transport of the Yellow River for many years, the Yellow River estuary and the old Yellow River estuary continue to be scoured, and the most serious part is about 3 m, and the northward siltation of the Yellow River can reach 1.5 m. The results of this study can better understand the changes of the coastline of the Yellow River Delta, and provide scientific guidance for the future development, management and sustainable development of the coastal zone of the Yellow River estuary.

Keywords: the Yellow River Delta; sediment scouring; MIKE21; numerical simulation

(责任编辑 李秀芳)

(上接第 200 页)

Abstract ID: 1673-8020(2024)03-0193-EA

Effects of Atmospheric Corrections on NDVI of Sentinel-2 Images of Coastal Wetlands

LIU Yanzhi¹, SU Bo², WANG Xuehong¹, ZHOU Jie¹, LI Yunzhao¹, YU Junbao¹, GUAN Bo¹, SONG Xiukai²

(1. The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264039, China;

2. Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China)

Abstract: In order to eliminate the atmospheric interference during the imaging process of satellite images and restore the real feature reflectivity, atmospheric correction has become a key link in quantitative remote sensing analysis research. In this paper, based on the Sentinel-2 images of the Yellow River Delta for 5 periods from 2018 to 2022, we explored the necessity of atmospheric correction for NDVI calculation by comparing and analyzing the NDVI before and after atmospheric correction. The results are as follows. (1) the atmospheric correction can significantly affect the overall NDVI of the Sentinel-2 images of coastal wetlands, as well as the NDVI of different land classes, but there is uncertainty in the effect on the NDVI of the Yellow River in different years; (2) there is no significant difference in the changes of spectral characteristics of NDVI between different land classes before and after atmospheric correction, but the atmospheric correction effectively enhances the range of NDVI extreme deviation and improves the differentiation of NDVI between different land classes. This study provides a reference basis for research on the effect of atmospheric correction on NDVI.

Keywords: atmospheric correction; coastal wetlands; Sentinel-2 images; NDVI; the Yellow River Delta

(责任编辑 顾建忠)