

DOI: 10.5846/stxb202104090915

孙志超, 祁雨薇, 汪东川, 姜杰, 韩明利, 赵人杰. 基于多源遥感影像的盐碱地治理效果. 生态学报, 2023, 43(15): 6406-6417.

Sun Z C, Qi Y W, Wang D C, Jiang J, Han M L, Zhao R J. Effectiveness of improving saline-alkali soil based on multi-source remote sensing images. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6406-6417.

基于多源遥感影像的盐碱地治理效果

孙志超^{1,*}, 祁雨薇¹, 汪东川^{2,3}, 姜杰¹, 韩明利¹, 赵人杰¹

1 天津绿茵景观生态建设股份有限公司, 天津 300384

2 天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384

3 天津城建大学, 天津市土木工程结构防护与加固重点实验室, 天津 300384

摘要: 将 Landsat-8 OLI 影像与 Sentinel-2 号影像结合, 利用光合有效辐射比率 (FPAR), 构建适用于 MODIS 植被总初级生产力 (GPP) 影像空间分辨率提高的逐层逐像元修正因子, 实现内蒙古巴彦淖尔市赵贵坨组盐碱地农田改良前后的植被长势监测, 同时结合不同深度土壤的含盐量数据, 采用转移矩阵方法与热点分析方法分别分析了全局土壤含盐量变化与植被长势变化的局部差异。结果表明: (1) 12—20 号地块内土壤含盐量改良效果最明显, 且研究区改良效果随土壤深度增加而逐渐降低。土壤深度 0—20cm, 盐土向中度盐土转入面积最大; 土壤深度 20—40cm, 强度盐土向中度盐土转入面积最大; 土壤深度 40—60cm, 强度盐土与盐土的转入面积大于转出面积, 其他土壤的转入面积小于转出面积。(2) 研究区内, GPP 提升区域比降低区域面积约多 60.36hm², 占研究区面积的 42.88%; 同时, 对改良前植被 GPP 低值区域提高效果更明显。(3) GPP 提升区域中热点区域集中分布在 12—17、25—27、34 号地块内, 该区域改良效果显著; GPP 降低区域中冷点区域集中分布在 6、12—14、22—23、27—28、30—31 号地块内, 该区域改良效果差。

关键词: 土壤含盐量; 植被总初级生产力; 空间异质性分析; 逐层逐像元修正因子

Effectiveness of improving saline-alkali soil based on multi-source remote sensing images

SUN Zhichao^{1,*}, QI Yuwei¹, WANG Dongchuan^{2,3}, JIANG Jie¹, HAN Mingli¹, ZHAO Renjie¹

1 Tianjin LVYIN Landscape and Ecology Construction Incorporated Company, Tianjin 300384, China

2 School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

3 Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract: In this paper, Landsat-8 OLI images were combined with Sentinel-2 images, and the Fraction of Photosynthetic Active Radiation (FPAR) was used to construct the pixel-by-layer correction factor that was applied to improve the spatial resolution of the MODIS Gross Primary Production (GPP) images. Based on this, the vegetation growth status before and after the improvement of saline-alkali farmland was studied in Zhaogui Gedan formation in Bayannur City, the Inner Mongolia. At the same time, combined with the data of soil salinity at different depths, this paper used the transfer matrix method and hot spot analysis method to study the global changes in soil salinity and the local differences in changes of vegetation growth. The results showed that: (1) the most obvious improvement effect of soil salinity was found in the plots 12—20, and the improvement effect gradually decreased with the increase of soil depth. In the soil depth 0—20 cm, the conversion area of the saline soil to the moderately saline soil was the largest; In the soil depth 20—40 cm, the conversion area of the severely saline soil to the moderately saline soil was the largest; In the soil depth 40—60 cm, the area

基金项目: 天津市科技计划项目 (19PTZJQY00010); 国家林业和草原局重点研发项目 (GLM [2021] 28 号)

收稿日期: 2021-04-09; **采用日期:** 2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13642136535@163.com

transferred in of the severely saline soil and the saline soil was larger than the area transferred out, while the area transferred in of the other soil types was smaller than the area transferred out. (2) The lifting area of GPP was about 603.6 thousand m^2 more than the lowering area, accounting for 42.88% of the study area. Meanwhile, the improvement effect was more obvious in the area with low GPP before improvement. (3) The hot spots in the lifting area of GPP were concentrated in the plots 12—17, 25—27, and 34, indicating that the improvement effect of this area was significant. The cold spots in the lowering area of GPP were concentrated in the plots 6, 12—14, 22—23, 27—28, and 30—31, indicating that the improvement effect in this area was poor.

Key Words: soil salinity; Gross Primary Production of vegetation; spatial heterogeneity analysis; Pixel-by-layer correction factor

土壤盐碱化是中国半干旱地区面临的重要资源与生态环境问题,制约着土地的可持续利用与农业的稳定高效发展^[1-3]。盐碱地作为农业方面重要的潜在后备资源,对其改良后利用是响应“国家高标准农田建设”,实现“2022 年建成 10 亿亩高标准农田”宏伟目标的重要举措。目前,盐碱地土壤改良技术已经发展成水利工程、化学生物、农艺调理相结合的综合改良技术,且已在不同地区获得较好的生态、经济及社会效益^[4-5]。盐碱地土壤改良项目完成后,存在 3a 或 5a 的改良技术效果追踪,最常用、最基本的方法为测定土壤含盐量变化直接反映技术效果,其中常用的含盐量测定方法为饱和泥浆法、电导率烘干法等^[6]。然而土壤含盐量测定需要现场采集大量的土壤样本并检测,费时、费力、成本高,且盐碱地土壤改良的最终目的是增加植被生态效益,即提升植被生态服务功能或增加农作物产量。相较于土壤取样检测方法,基于遥感技术监测植被的生态效益具有便捷高效、全域成像、动态可视、成本较低等优势,更适用于生态修复项目的改良技术效果追踪。

扶松林研究表明,时空尺度上单位面积粮食产量与植被总初级生产力(GPP)之间显著正相关^[7],且 GPP 反映了植被的固碳生态效益^[8],故通过分析植被 GPP 变化量反映工程修复的生态效益切实可行。另外,植被生态效益与植被长势显著正相关^[9-11],可通过分析 MODIS、Landsat、Sentinel 等遥感影像的植被光谱差异,构建归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)等反映植被长势^[12-13],且已在华北平原^[14]、青藏高原^[15]、新疆^[16]等地区得到应用,同样适用于小麦、玉米等农作物长势监测^[17-19]。目前,空间分辨率最高且能够直接提取 GPP 数据的遥感数据为 MOD17A2H 产品,已普遍应用于流域、城市群、省域等大尺度地区的生态效益研究中^[20-23]。此 GPP 数据的空间分辨率为 500m,然而生态修复工程项目的面积一般较小,明显不适用于项目改良技术效果的区域差异分析,故必须进行空间尺度转换^[24],提高 GPP 数据的空间分辨率。成方妍等研究表明 Landsat NDVI 与净初级生产力(NPP)的线性关系显著^[8],钱娅等研究表明基于 Landsat 数据计算的吸收性光合有效辐射(APAR)可以有效响应玉米实际 GPP 值的季节性波动^[25],李振旺等研究利用多源多尺度卫星遥感数据(环境、哨兵-2、Landsat、MODIS、GOME 等)识别了中国北方草原区 GPP 分布特征^[26]。以上研究表明,基于 Landsat 或 Sentinel 数据的植被指数能够实现 GPP 数据的空间分辨率提高至 30m 或 10m,属于两种遥感数据的融合方式。若在 Sentinel 数据、GPP 数据的空间尺度转换中,增加 Landsat 数据,基于逐层次、逐像元的思路,依旧能够实现 GPP 数据的空间分辨率提高至 10m,而且利用两种空间分辨率植被指数的信息融合,可以增加 GPP 数据的稳定性和准确性,减轻数据间分辨率差距大对尺度转换精度的影响程度,是多源数据间尺度转换的一种新思路。

本研究以内蒙古巴彦淖尔市赵贵圪旦组盐碱地为研究区,以植被净生产力反演模型(CASA)中应用的 NDVI、比值植被指数(SR)为基础,利用 30m 空间分辨率的 Landsat-8 OLI 影像与 10m 空间分辨率的 Sentinel-2 号两种遥感影像,基于移动窗口法原理,首先在边长 500m 的窗口内将空间分辨率为 500m 的 GPP 数据修正至 30m,然后在边长 30m 的窗口内将空间分辨率为 30m 的 GPP 数据修正至 10m,完成逐层逐像元修正后,应用热点分析方法探究盐碱地治理效果的空间异质性,同时利用转移矩阵方法对土壤深度 0—20cm、20—40cm、40—60cm 的含盐量变化进行了分析,以期反映盐碱地改良技术带来的全局变化效果,为种植区域合理布置与

重点治理区域精准定位提供参考,同时该技术适用于其他生态修复工程的生态效益评估。

1 研究区概况

研究区属于 2018 年千亿斤粮食增产工程“改盐增草(饲)兴牧”示范项目,位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗乌拉山镇菻亥村赵贵圪旦组,面积约 163.87hm²。基于研究区内的排盐渠沟,将项目区划分为 39 个地块,如图 1 所示。研究区气候属于中温带大陆性季风气候,雨热同期,昼夜温差大。水道属于黄河水系,距离黄河主干道仅 3km,引黄灌溉水的入渗是地下水的主要来源,且平均地下水位在 0.5m 左右。地貌类型为黄河冲积平原,土壤以黄河泛滥沉积物为主,土壤类型主要为重壤和壤粘土,土壤盐渍化现象严重,受土地盐渍化影响,碱蓬、碱草等盐生植被零星分布^[27],种植农作物主要为食葵,食葵年均产量在 750kg/hm²至 3750kg/hm²范围内。

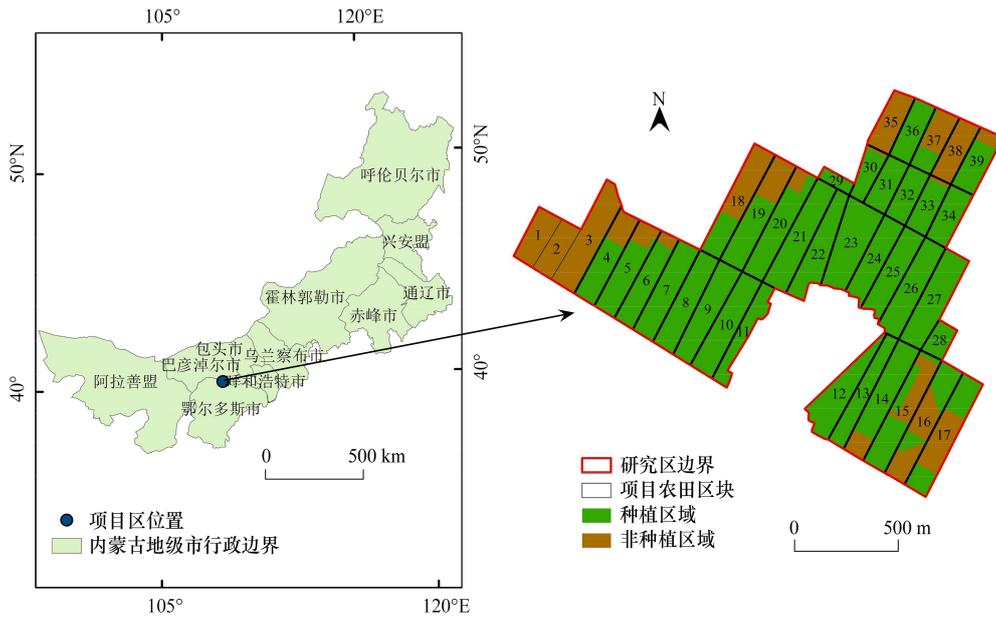


图 1 研究区行政边界

Fig.1 Administrative boundaries of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 土壤数据

根据《盐碱化耕地普查技术标准》对研究区进行土壤普查,以多点取样检测方法为主。土壤取样点如图 2 所示,以每点控制 0.1km²土地面积为原则进行网格分布布点 16 个,利用内径为 3cm 的土钻对每个取样点分三次、分三层 0—20cm、20—40cm、40—60cm 进行取土样,2018 年 9 月与 2020 年 8 月分别取样 48 个,基于饱和泥浆法测定土壤含盐量后,利用克里金空间插值方法生成研究区土壤含盐量分布数据,数据空间分辨率为 10m,见图 3。由于该项目运用的土壤改良技术符合暗管排盐技术基本原理,故本研究参考《中华人民共和国土地管理行业标准(2013)》,暗管改良盐碱地技术规程

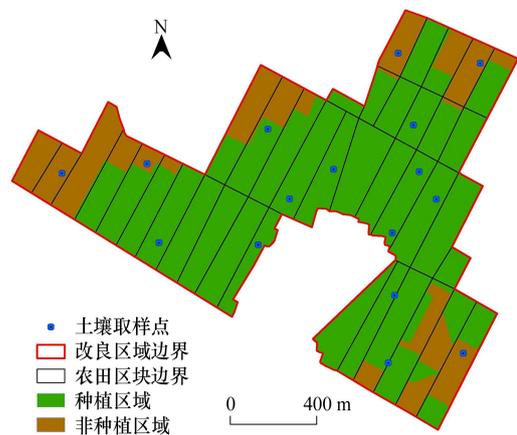


图 2 土壤取样点位置

Fig.2 Location of soil sampling points

第一部分:土壤调查(标准代号:TD/T1043.1—2013)中规定的土壤盐化分级指标,将研究区土壤含盐量分为 5 个等级^[6],如表 1。同时,此标准明确了该分级指标适用于滨海、半湿润、半干旱、干旱区。

表 1 土壤含盐量等级

Table 1 Classification of soil salt content

	非盐土 Non saline soil	轻度盐土 Slightly saline soil	中度盐土 Moderately saline soil	强度盐土 Severely saline soil	盐土 Saline soil
土壤含盐量 Soil salt content / (g/kg)	[0,1)	[1,2)	[2,4)	[4,6)	[6,)

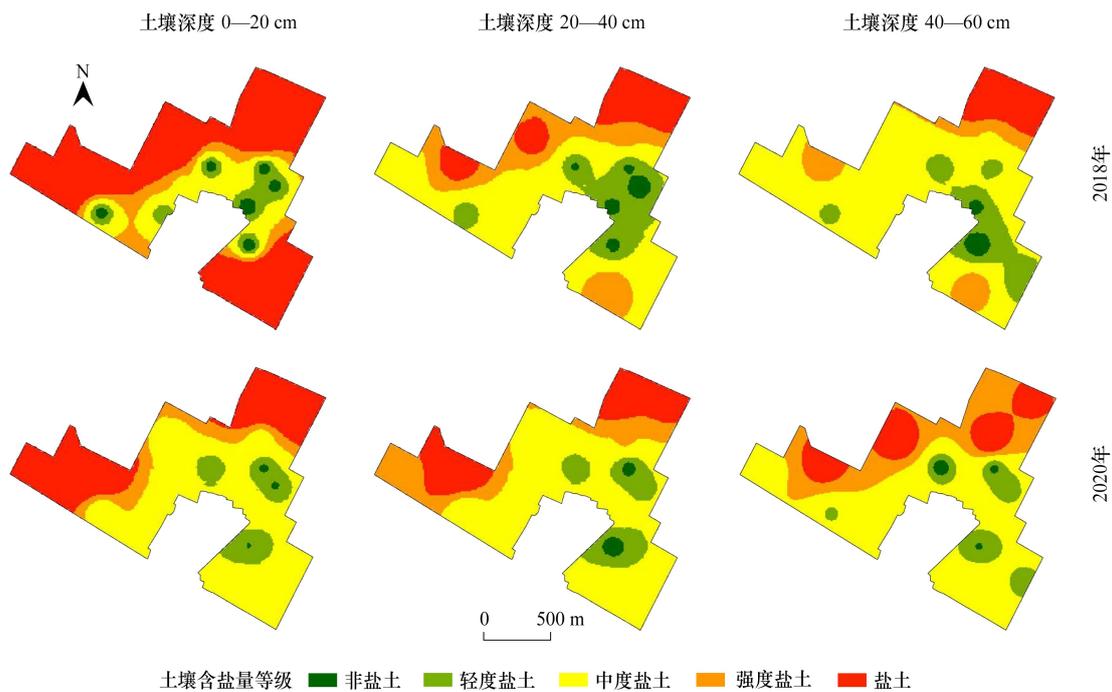


图 3 土壤深度 0—60cm 盐化等级空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of salinization grade in soil depth 0—60cm

2.1.2 植被数据

植被数据分为 NDVI 数据与 GPP 数据,NDVI 数据来自美国 Earth Date search 网站 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) 下载的 Landsat-8 OLI 数据与从欧空局 Open Hub 网站 (<https://scihub.copernicus.eu/>) 下载的 Sentinel-2 号数据,Landsat-8 OLI 数据日期为 2018 年 8 月 3 日、2020 年 9 月 7 日,Sentinel-2 号数据日期为 2018 年 8 月 20 日、2020 年 8 月 9 日。GPP 数据来源于从美国 Earth Date search 网站下载的 MOD17A2H 数据,日期为 2018 年 8 月 30 日、2020 年 8 月 29 日,以上影像无云层干扰。将以上三种数据采用统一的空间坐标系,同时将空间分辨率统一重采样为 10m。

2.2 方法

2.2.1 土壤盐化等级变化分析方法

转移矩阵方法最初适用于反映某一区域不同地类面积在两个不同时间节点内相互转化的动态过程信息^[28],本研究中基于此方法探讨 2018 年与 2020 年五类土壤盐化等级面积相互转换的动态信息,转移矩阵公式^[29]为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} (S_{11} & \cdots & S_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (S_{n1} & \cdots & S_{nn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S 表示面积; i 与 j 分别表示转移前后的土壤盐化等级; S_{ij} 表示转移前第 i 类盐化等级向转移后第 j 类盐化等级转移的面积; n 表示土壤盐化等级总数, 本研究中 n 为 5。

2.2.2 GPP 数据空间分辨率提高方法

光合有效辐射比率 (FPAR) 是衡量植被冠层对光合有效辐射能量吸收能力的一个重要参数, 其估算精度直接影响陆地生态系统 GPP 的估算精度^[30-32]。CASA 模型是基于遥感技术估算 FPAR 的主要方法, 其原理是利用 NDVI 与比值植被指数 (SR) 构建关系模型进行估算^[33]。为精准反映研究区内的植被总初级生产力, 本文基于 Landsat-8 OLI 数据与 Sentinel-2 数据依次构建 GPP 30m 与 10m 空间分辨率的 FPAR 调节因子, 实现对 MODIS 500m 空间分辨率 GPP 数据的空间分辨率提高, 以期更精确反映研究区内植被总初级生产力的空间差异及其动态变化特征。技术路线图见图 4。

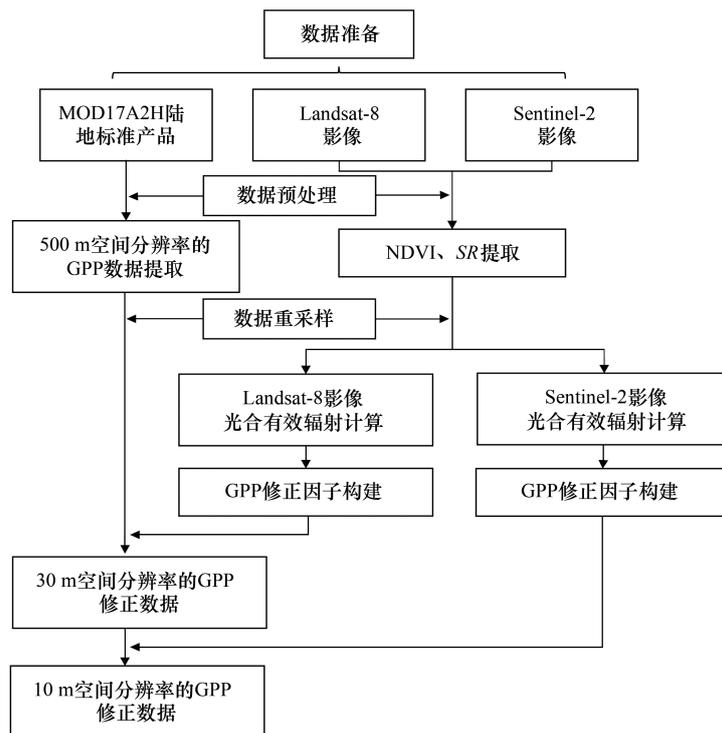


图 4 技术路线图

Fig.4 Methodological workflow

基于 Landsat-8 OLI 数据与 Sentinel-2 数据分别计算 NDVI 与 SR, 计算公式如下:

$$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_R}{B_{NIR} + B_R} \quad (2)$$

$$SR = \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \quad (3)$$

式中, B_{NIR} 与 B_R 依次代表遥感影像的近红外波段与红波段。

基于以上数据利用以下公式分别计算 Landsat-8 与 Sentinel-2 数据的 FPAR^[32]。

$$FPAR = \frac{\left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 0.949 \right) + \left(\frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}} \times 0.949 \right)}{2} + 0.001 \quad (4)$$

式中, FPAR 是光合有效辐射, $NDVI_{\max}$ 与 $NDVI_{\min}$ 依次为研究区植被的 NDVI 最大值与最小值, SR_{\max} 与 SR_{\min} 依次为研究区植被的 SR 最大值与最小值。

依据图 5, 利用以下公式分别构建基于 Landsat-8 与 Sentinel-2 植被指数数据的 GPP 修正因子, 修正因子在 Arcgis 10.2 软件中采用 Python 语言二次开发计算所得。

$$AL = \frac{FPAR_L}{FPAR_{Lmean}} \quad (5)$$

$$FPAR_{Lmean} = \frac{\sum_{i=1}^{2500} FPAR_{Li}}{2500} \quad (6)$$

$$AS = \frac{FPAR_S}{FPAR_{Smean}} \quad (7)$$

$$FPAR_{Smean} = \frac{\sum_{j=1}^9 FPAR_{Si}}{9} \quad (8)$$

式中, AL 是基于 Landsat-8 影像生成的 GPP 修正因子, AS 是基于 Sentinel-2 影像生成的 GPP 修正因子。 $FPAR_L$ 是 MOD17A2H 陆地标准产品分辨率 ($500m \times 500m$) 窗口内对应基于 Landsat-8 生成修正因子值, $FPAR_{Lmean}$ 是 MOD17A2H 陆地标准产品分辨率 ($500m \times 500m$) 窗口内对应基于 Landsat-8 生成的修正因子平均值。 $FPAR_S$ 是 Landsat-8 影像分辨率 ($30m \times 30m$) 窗口内对应基于 Sentinel-2 生成的修正因子值, $FPAR_{Smean}$ 是 Landsat-8 影像分辨率 ($30m \times 30m$) 窗口内对应基于 Sentinel-2 生成的修正因子平均值。

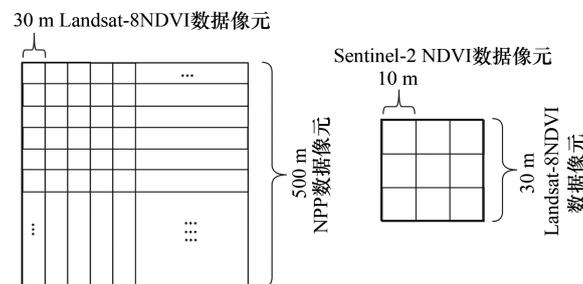


图 5 三种数据空间分辨率关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of the relationship between three kinds of spatial resolution data

利用 GPP 修正公式对 MOD17A2H 陆地标准产品中提取的 GPP 数据进行修正。

$$GPP_A = GPP_{AS} = AS \times GPP_{AL} \quad (9)$$

$$GPP_{AL} = AL \times GPP \quad (10)$$

式中, GPP_A 为修正后的 GPP 数据, 空间分辨率为 10m; GPP_{AS} 与 GPP_{AL} 分别为利用 Sentinel-2 与 Landsat-8 数据修正后的 GPP 数据。

2.2.3 GPP 变化分析方法

为探讨竖井排盐工程等改良技术对农作物长势的影响效果, 本研究利用公式 11 分析工程施工前后 GPP 的变化量 (GPP Change, GC), 公式为:

$$GC = GPP_{\text{施工后}} - GPP_{\text{施工前}} \quad (11)$$

热点分析方法是识别具有统计显著性的高值 (热点) 与低值 (冷点) 空间聚类区域的重要方法, 同时可将空间聚类的地理位置可视化表达^[34]。为充分反映工程改良效果在研究区内的差异, 本文利用热点分析方法

探讨 GPP 变化量的空间异质性。 G_i^* 的绝对值越大,代表 GPP 变化量低值或高值聚集的程度就越高,当 $G_i^* > 0$,该聚集区域为高值聚集区域(热点区域);当 $G_i^* < 0$,该聚集区域为低值聚集区域(冷点区域)。 G_i^* 计算公式^[35]为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i}{\sum_{j=1}^n x_i} \quad (12)$$

式中, G_i^* 的统计显著性是利用标准化 Z 值检验^[36-37],对 G_i^* 进行标准化处理得到 $Z(G_i^*)$, $Z(G_i^*)$ 统计值与显著性热点/冷点区域划分见表 2。 $Z(G_i^*)$ 公式:

$$Z(G_i^*) = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i - \bar{x} \sum_{i=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2} \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{i=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (13)$$

式中, n 表示地理空间单元数; w_{ij} 为第 i 个与第 j 个地理空间单元的空间权重系数, w_{ij} 在本文中由反距离权重计算方法自动生成; x_i 是第 i 个地理空间单元内某现象的发生数,本文中指 GPP 的变化量; \bar{x} 为研究区内 GPP 变化量的地理空间单元平均值。

3 结果与分析

3.1 土壤含盐量变化结果分析

从图 3、表 3 中,发现土壤改良效果最明显的区域为 12—20 号地块,且不同土壤深度中不同盐化等级转入转出面积存在差异,土壤含盐量改良效果随深度增加逐渐降低,这种现象与竖井排盐工程导致地下水位下降,使得上层土壤中无机盐溶于水后,随水位逐渐下降至深层土壤有关。具体表现为:土壤深度 0—20cm,强度盐土、盐土的面积转为转出状态,转出面积共约 64.69hm²;而土壤深度 40—60cm,强度盐土、盐土的面积转为转入状态,转入面积共约 30.76hm²。

表 3 土壤深度 0—60cm 盐化等级转移面积表/hm²

Table 3 Table of salinization grade transfer area in soil depth 0—60cm

土壤深度 Soil depth /cm	非盐土 Non saline soil	轻度盐土 Slightly saline soil	中度盐土 Moderately saline soil	强度盐土 Severely saline soil	盐土 Saline soil
[0,20)	-3.27	+4.61	+63.35	-3.00	-61.69
[20,40)	-2.24	-10.60	+21.84	-10.77	+1.77
[40,60]	-2.00	-8.37	-20.39	+21.33	+9.43

表 4 中知,土壤深度 0—20cm,中度盐土面积大量增加,盐土面积大量减少,其中中度盐土面积增加的主要来源是盐土,面积约 47.48hm²,其次为强度盐土,面积约 14.77hm²。表 5 中发现,土壤深度 20—40cm,中度盐土的转入量最大,面积约 43.21hm²,强度盐土与盐土的转入量次之,分别约 19hm²、10.48hm²。其中,中度盐土面积增加的主要来源是强度盐土,面积约 20.96m²,其次为轻度盐土,面积约 15.68hm²。强度盐土与盐土转移面积的主要来源分别是中度盐土、强度盐土,转移量分别约 15.79hm²、8.81hm²。表 6 中发现,土壤深度 40—60cm,含盐量较低的非盐土、轻度盐土、中度盐土均为转出状态,强度盐土与盐土均为转入状态。其中中度盐土面积转出量最大,约 20.39hm²,主要转移方向为强度盐土与盐土,转移面积分别约 24.35hm²、12.65hm²;

表 2 显著性热点/冷点区域分类

Table 2 Classification of significant hot/cold spots

	热点区 Hot spots	冷点区 Cold spots	不显著区 No significant area
$Z(G_i^*)$	$Z(G_i^*) > 1.65$	$Z(G_i^*) < -1.65$	$-1.65 \leq Z(G_i^*) \leq 1.65$

$Z(G_i^*)$: G_i^* 标准化处理后的结果

轻度盐土的转出量次之,面积约 8.37hm²,主要转移方向为中度盐土;强度盐土与盐土的转入面积分别约 36.79hm²、21.87hm²。强度盐土的转移来源主要为中度盐土与盐土,面积依次约 24.35hm²、12.44hm²;盐土的转移来源主要为中度盐土与强度盐土,面积依次约 12.65hm²、9.22hm²。

表 4 土壤深度 0—20cm 盐化等级面积转移矩阵表/hm²

Table 4 Transfer matrix table of salinization grade area in soil depth 0—20cm

土壤盐化等级 Classification of soil salinity	非盐土 Non saline soil	轻度盐土 Slightly saline soil	中度盐土 Moderately saline soil	强度盐土 Severely saline soil	盐土 Saline soil
非盐土 Non saline soil	0.67	1.60	1.68	0.00	0.00
轻度盐土 Slightly saline soil	0.00	7.09	6.13	0.00	0.00
中度盐土 Moderately saline soil	0.00	6.32	26.48	0.39	0.00
强度盐土 Severely saline soil	0.00	1.89	14.77	3.34	0.00
盐土 Saline soil	0.00	0.94	47.48	13.27	53.04

表 5 土壤深度 20—40cm 盐化等级面积转移矩阵表/hm²

Table 5 Transfer matrix table of salinization grade area in soil depth 20—40cm

土壤盐化等级 Classification of soil salinity	非盐土 Non saline soil	轻度盐土 Slightly saline soil	中度盐土 Moderately salize soil	强度盐土 Severely saline soil	盐土 Saline soil
非盐土 Non saline soil	1.21	2.58	1.07	0.00	0.00
轻度盐土 Slightly saline soil	1.41	13.08	15.68	0.00	0.00
中度盐土 Moderately saline soil	0.00	3.91	58.45	15.79	1.67
强度盐土 Severely saline soil	0.00	0.00	20.96	9.35	8.81
盐土 Saline soil	0.00	0.00	5.50	3.21	22.40

表 6 土壤深度 40—60cm 盐化等级面积转移矩阵表/hm²

Table 6 Transfer matrix table of salinization grade area in soil depth 40—60cm

土壤盐化等级 Classification of soil salinity	非盐土 Non saline soil	轻度盐土 Slightly saline soil	中度盐土 Moderately saline soil	强度盐土 Severely saline soil	盐土 Saline soil
非盐土 Non saline soil	0.20	2.47	0.88	0.00	0.00
轻度盐土 Slightly saline soil	1.35	10.99	14.34	0.00	0.00
中度盐土 Moderately saline soil	0.00	4.84	72.44	24.35	12.65
强度盐土 Severely saline soil	0.00	0.00	6.24	4.61	9.22
盐土 Saline soil	0.00	0.00	0.00	12.44	7.62

3.2 植被总初级生产力变化结果分析

3.2.1 植被总初级生产力变化量分析

由图 6 得,修正后的 GPP 数据在项目区内的空间异质性明显,可以准确判断不同地块盐碱地土壤改良工程的修复效果。为进一步探讨研究区植被长势的变化规律,该部分将未种植农作物的地块剔除,统计分析种植区域的 GPP 变化量。基于此,利用分位数法将 2018 年 GPP 数据与 GPP 提升/降低区域数据分别分为 5 级,GPP 提升区域从 I 级至 V 级变化强度逐渐增加,而 GPP 降低区域从 I 级至 V 级变化强度逐渐降低,分级标准见表 7。

表 7 数据等级表/(g C/m²)

Table 7 Table of data grading

等级 Grade	2018 年 GPP GPP of 2018	GPP 提升区域 Lifting area of GPP	GPP 降低区域 Lowering area of GPP
I	[2.75, 12.03)	[0, 3.82)	[-32.30, -9.22)
II	[12.03, 15.56)	[3.82, 7.14)	[-9.22, -5.63)
III	[15.56, 19.14)	[7.14, 10.47)	[-5.63, -3.38)
IV	[19.14, 25.32)	[10.47, 15.14)	[-3.38, -1.59)
V	[25.32, 65.88)	[15.14, 54.21)	[-1.59, 0)

GPP: 植被总初级生产力 Gross primary production

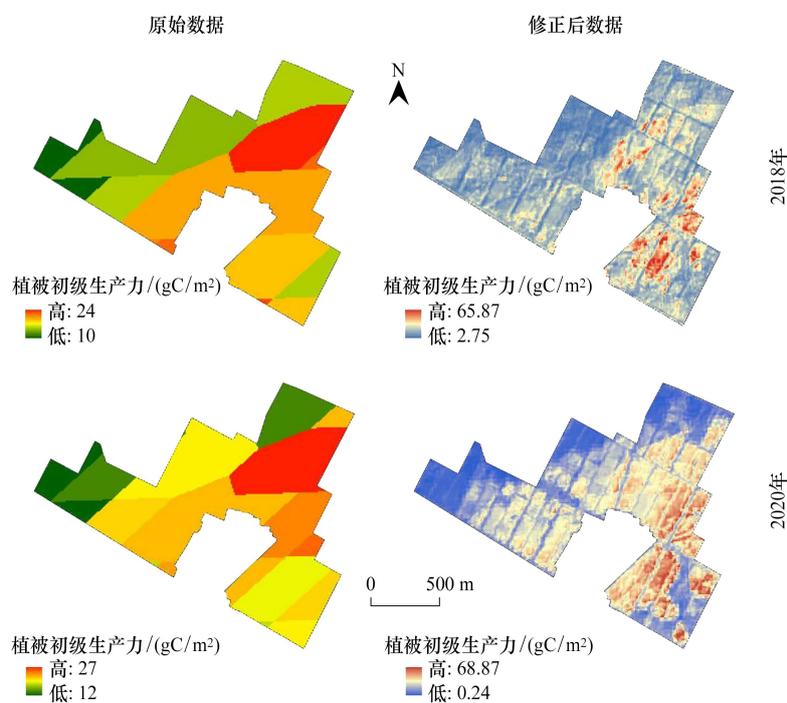


图 6 GPP 数据修正前后对比图

Fig.6 Comparison of GPP data before and after correction

表 8、表 9 表明,研究区内 GPP 提升区域面积明显大于其他区域面积,面积约多 60.36hm^2 ,说明竖井排盐工程治理效果显著。2018 年 GPP 数据的前四类,其提升区域面积明显大于降低区域面积,而其第五类数据的提升区域面积小于降低区域面积,这说明盐碱地改良技术对 GPP 低值区域的改良效果优于 GPP 高值区域。

在 2018 年 GPP 数据的 I、II 等级,提升区域的 IV、V 等级的面积稍大于 I、II、III 等级,降低区域的 IV、V 等级的面积稍大于 I、II 等级,这说明在 GPP 数据低值区域,提升区域变化强度大的面积要大于变化强度小的面积,而降低区域变化强度大的面积要小于变化强度小的面积。

在 2018 年 GPP 数据的 IV、V 等级,提升区域变化强度从 I 级至 V 级,面积量逐渐减少,降低区域变化强度从 I 级至 V 级,面积量同样有逐渐降低趋势,这说明在 GPP 数据高值区域,提升区域变化强度大的面积要小于变化强度小的面积,而降低区域变化强度大的面积要大于变化强度小的面积。

在 2018 年 GPP 数据的 III 等级,提升区域变化强度从 I 级至 V 级,面积程递增趋势,降低区域变化强度 I 级、V 级的面积存在明显小于其他等级面积的趋势,这说明在 GPP 数据中值区域,提升区域变化强度大的面积要大于变化强度小的面积,而降低区域变化强度最小与最大的面积要小于变化强度中等的面积。

表 8 GPP 提升区域变化强度分级统计表/ hm^2

Table 8 Hierarchical statistical table of Change intensity in the lifting area of GPP

等级 Grade	I	II	III	IV	V	合计 Total
I	4.35	4.27	5.12	5.52	5.11	24.37
II	3.47	4.12	4.57	4.91	5.56	22.63
III	3.58	4.3	4.28	4.19	4.77	21.12
IV	4.23	4.09	4.05	3.6	3.36	19.33
V	4.49	3.34	2.09	1.89	1.31	13.12

表 9 GPP 降低区域变化强度分级统计表/hm²

Table 9 Hierarchical statistical table of Change intensity in the lowering area of GPP

等级 Grade	I	II	III	IV	V	合计 Total
I	0	0.37	0.63	1.2	1.59	3.79
II	0.17	0.85	1.51	1.45	1.55	5.53
III	0.7	1.83	1.64	1.57	1.3	7.04
IV	1.94	1.95	1.8	1.64	1.49	8.82
V	5.24	3.04	2.46	2.18	2.11	15.03

3.2.2 植被总初级生产力变化量的空间异质性分析

本研究基于热点分析方法得到 GPP 提升与降低区域内变化程度的空间分布图,以期说明 GPP 变化强度的空间分布差异。图 7 表明,提升区域的冷点区域分布较零散,在 4—9 号、18—24 号地块面积占比较大,说明此区域盐碱地改良技术对植被 GPP 的提升效果不明显;而提升区域的热点区域集中分布在 12—17、25—27、34 号地块,说明工程技术对此区域的植被 GPP 提高有明显改善效果;除 4、28、30、36 号地块不存在提升区域中的其他区域,其他地块均含有,说明工程技术的改良效应在以上区域内表现不强烈。降低区域的其他区域多分布在地块之间的边界区域,说明工程技术改良效果较差,反作用程度一般;冷点区域集中分布在 6、12—14、22—23、27—28、30—31 号地块内,说明这些区域内工程技术对植被 GPP 有明显的降低作用,更说明改良效果最差,有严重的反作用;而其热点区域多分布在 3—4、18—19 号地块内,说明工程技术改良效果较差,反作用程度较轻。研究结果将为次年该区域农作物种植提供参考,即重点关注降低区域内植被的生长状态。

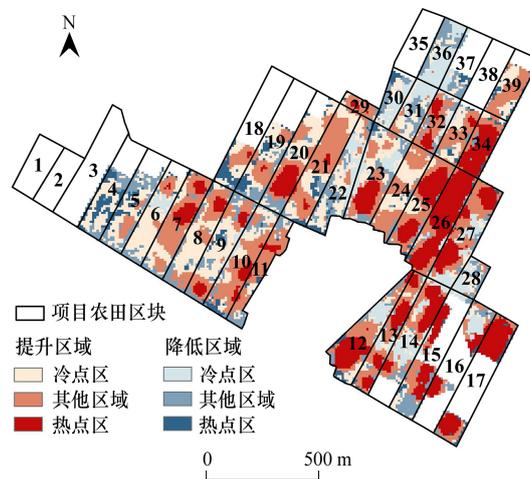


图 7 GPP 提升/降低区域变化强度分布图

Fig.7 Distribution map of change intensity in the lifting/lowering area of GPP

4 结论与讨论

通过分析赵贵圪旦组盐碱地改良前后土壤含盐量与农作物 GPP 变化情况,主要结论包括:

(1) 12—20 号地块为土壤改良效果的显著区域,且土壤深度 0—20cm 含盐量的降低效果显著,其中盐土面积减少 61.69hm²。表层土壤盐分下渗,造成土壤深度 20—40cm 与 40—60cm 非盐土、轻度盐土、中度盐土的面积转出量增加,而强度盐土与盐土的面积转入量增加显著。

(2) 农作物种植区域内,GPP 提高区域面积占比 70%以上,且 GPP 提高区域约为降低区域面积的 2.5 倍,说明盐碱地改良技术对 70%以上的区域存在正向作用,且该技术对 2018 年 GPP 低值区域的改良效果优于

GPP 高值区域。

(3) 基于移动窗口法+逐层逐像元的修正原理,修正后的 GPP 数据能够精准反映 GPP 变化的空间差异,具体表现为改良效果在农作物种植的东部区域优于西部区域,在最北部区域效果最差,且在 6、12—14、22—23、27—28、30—31 号地块内,GPP 降低效果显著。

本研究通过构建逐层逐像元修正因子,将 Landsat-8 OLI 影像、Sentinel-2 号影像、MODIS GPP 数据融合,将 GPP 数据的空间分辨率从 500m 提高至 10m。基于此,融合空间分辨率为亚米级的高分数据,空间分辨率将为亚米级,将有助于进一步精确定位土壤改良效果较差区域,有利于生态效益的空间异质性分析。另外,通过参考本文构建的 GPP 数据融合技术,不仅能够实现 GPP 数据的空间尺度转换,而且为其他类型数据融合提供思路,从而实现多源数据的空间尺度转换,故将该技术推广至其他数据集的融合需进一步通过实验验证效果。

为获取较高空间分辨率的 GPP 数据,最基本方法为利用较高空间分辨率的 GPP 计算模型因子修正原始 GPP 数据,仅采用一种数据修正 GPP 数据的研究较多^[24],本研究引用 Landsat、Sentinel 两种数据,依次将 GPP 的空间分辨率提高至 30m、10m,增加逐层降尺度过程,符合数据融合的优势,增加 GPP 数据的稳定性和准确性。然而,本研究未揭示两种数据修正结果与一种数据修正结果间的差异,将需要依据不同场景量化证明。

参考文献(References):

- [1] Li X W, Jin M G, Huang J N, Yuan J J. The soil-water flow system beneath a cotton field in arid north-west China, serviced by mulched drip irrigation using brackish water. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(1): 35-46.
- [2] 王俊枝,薛志忠,张弛,常屹冉. 内蒙古河套平原耕地盐碱化时空演变及其对产能的影响. *地理科学*, 2019, 39(5): 827-835.
- [3] 杨帆,王志春,马红媛,杨福,田春杰,安丰华. 东北苏打盐碱地生态治理关键技术研发与集成示范. *生态学报*, 2016, 36(22): 7054-7058.
- [4] 李建国,濮励杰,朱明,张润森. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点. *地理学报*, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [5] Liu L P, Long X H, Shao H B, Liu Z P, Ya T, Zhou Q S, Zong J Q. Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 328-334.
- [6] 杨晓潇,王秀兰,王计平,范晨晨,李慧杰. 天津市滨海新区土壤盐空间变异分析. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 39-47.
- [7] 扶松林,孔令颖,周海香,刘文兆. 泾河流域粮食产量与生产潜力时空分布特征及其与 MODIS-GPP 的关系. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 192-199.
- [8] 成方妍,刘世梁,张月秋,尹艺洁,侯笑云. 基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响. *生态学报*, 2017, 37(18): 5924-5934.
- [9] Wang D C, Chen J H, Zhang L H, Sun Z C, Wang X, Zhang X, Zhang W. Establishing an ecological security pattern for urban agglomeration, taking ecosystem services and human interference factors into consideration. *PeerJ*, 2019, 7: e7306.
- [10] 纪中华,方海东,杨艳鲜,潘志贤,沙毓沧. 金沙江干热河谷退化生态系统植被恢复生态功能评价——以元谋小流域典型模式为例. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1383-1389.
- [11] 肖强,肖洋,欧阳志云,徐卫华,向轼,李勇志. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2014, 34(1): 216-223.
- [12] Liang L, Schwartz M D, Fei S L. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(1): 143-157.
- [13] 宋富强,邢开雄,刘阳,刘志超,康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.
- [14] 曹艳萍,秦奋,庞营军,赵芳,黄金亭. 2002-2016 年华北平原植被生长状况及水文要素时空特征分析. *生态学报*, 2019, 39(5): 1560-1571.
- [15] 陈济丁,孔亚平,何子文. 青藏高原多年冻土地区公路边坡植被生长的观测与研究. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 704-709.
- [16] 潘霞,汪季,张勇,高永,王祯仪. 基于 MODIS 数据的阿拉善盟植被指数变化的地形分异性. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 226-234.
- [17] Feng W, Yao X, Tian Y C, Cao W X, Zhu Y. Monitoring leaf pigment status with hyperspectral remote sensing in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2008, 59(8): 748-760.
- [18] 刘新杰,魏云霞,焦全军,孙奇,刘良云. 基于时序定量遥感的冬小麦长势监测与估产研究. *遥感技术与应用*, 2019, 34(4): 756-765.
- [19] 邹文涛,吴炳方,张森,郑阳. 农作物长势综合监测——以印度为例. *遥感学报*, 2015, 19(4): 539-549.
- [20] Wang L C, Zhu H J, Lin A W, Zou L, Qin W M, Du Q Y. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy

- covariance flux data. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 418.
- [21] Cui T X, Wang Y J, Sun R, Qiao C, Fan W J, Jiang G Q, Hao L Y, Zhang L. Estimating vegetation primary production in the Heihe River Basin of China with multi-source and multi-scale data. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153971.
- [22] 王媛媛, 谢正辉, 贾炳浩, 于燕. 基于陆面过程模式 CLM4 的中国区域植被总初级生产力模拟与评估. *气候与环境研究*, 2015, 20(1): 97-110.
- [23] 王鹤松, 贾根锁, 冯锦明, 赵天保, 马柱国. 我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化. *大气科学*, 2010, 34(5): 882-890.
- [24] 王莉雯, 卫亚星, 牛铮. 净初级生产力遥感估算模型空间尺度转换. *遥感学报*, 2010, 14(6): 1074-1089.
- [25] 钱娅, 郭建茂, 李羚, 郭彩云, 刘俊伟. 基于 MODIS 数据的三种模型对区域玉米生产力的估算效果. *中国农业气象*, 2021, 42(4): 297-306.
- [26] 李振旺. 中国北方草原关键光合参数遥感反演与验证方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [27] 王海梅, 侯琼, 云文丽, 高飞翔, 杨钦宇. 内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度. *生态学报*, 2014, 34(11): 2948-2953.
- [28] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 王亚华. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例. *地理研究*, 2013, 32(8): 1497-1507.
- [29] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. *地理学报*, 2003, 58(5): 643-650.
- [30] 高彦华, 陈良富, 柳钦火, 顾行发, 田国良. 叶绿素吸收的光合有效辐射比率的遥感估算模型研究. *遥感学报*, 2006, 10(5): 798-803.
- [31] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 58-66.
- [32] 周自翔, 李晶, 冯雪铭. 基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价. *生态学报*, 2013, 33(9): 2907-2918.
- [33] 尹锴, 田亦陈, 袁超, 张飞飞, 苑全治, 花利忠. 基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释. *国土资源遥感*, 2015, 27(1): 133-139.
- [34] 汪东川, 孙志超, 孙然好, 陈俊合, 张威, 张仙, 王潇. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1285-1296.
- [35] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [36] 范新生, 应龙根. 中国 SARS 疫情的探索性空间数据分析. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 282-291.
- [37] Wang D C, Sun Z C, Chen J H, Wang X, Zhang X, Zhang W. Analyzing the interpretative ability of landscape pattern to explain thermal environmental effects in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *PeerJ*, 2019, 7: e7874.