中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于APSIM模型的大气气溶胶直接辐射效应对我国玉米产量的影响评估

孔祥娜, 赵俊芳, 徐慧, 徐精文

引用本文:
孔祥娜, 赵俊芳, 徐慧, 等. 基于APSIM模型的大气气溶胶直接辐射效应对我国玉米产量的影响评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 994−1003.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181071

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1961−2010年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析

Impact simulation of climate change on potential and rainfed yields of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010

中国生态农业学报. 2016(3): 293−305 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150962

华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应

Analysis of spatial and temporal variation in potential summer maize yield and its response to climate change in the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 865−876 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170806

多模式集合模拟气候变化对玉米产量的影响

Multi−model ensemble for simulation of the impact of climate change on maize yield

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 941−948 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161152

干旱胁迫对玉米物候及产量组成的影响及模拟研究

Effect of drought stress on maize phenology and yield components and its simulation

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1779−1788 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190390

基于WOFOST作物模型的玉米区域干旱影响评估技术

Evaluation of regional drought disaster to maize using WOFOST crop growth model

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 451−459 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160677

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.181071

孔祥娜, 赵俊芳, 徐慧, 徐精文. 基于 APSIM 模型的大气气溶胶直接辐射效应对我国玉米产量的影响评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 994−1003
KONG X N, ZHAO J F, XU H, XU J W. Assessment of the direct radiation effect of atmospheric aerosol on maize yield in China by using APSIM model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 994−1003

基于 APSIM 模型的大气气溶胶直接辐射效应对我国玉米产量的影响评估*

孔祥娜[1,2], 赵俊芳[2**], 徐 慧[2], 徐精文[1]

(1. 四川农业大学资源学院 成都 611130; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 北京 100081)

摘 要: 在大气气溶胶污染日益严重的时代背景下, 气溶胶对农作物生长发育的影响越来越不可忽视。本文以全球气溶胶监测网(AErosol RObotic NETwork, AERONET)中具有常年观测数据的我国北京、香河和太湖为研究站点, 利用 AERONET 多年观测资料以及 MODIS 地表反照率数据, 借助 6S(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum)辐射传输模式, 计算出 2001—2014 年研究站点的气溶胶直接辐射效应, 评估了 APSIM(Agricultural Production Systems Simulator)作物模型的适用性, 运用验证适用的 APSIM 模型分析了气溶胶直接辐射效应对我国玉米产量的影响。结果表明: 1)验证后的 APSIM 玉米模型在我国北京、香河和太湖玉米产区具有较好的适用性。APSIM 模型在模拟玉米的发育期以及产量中的模拟结果较好, 其中各站点产量的相对均方根误差(NRMSE)为 1.55%~6.24%, 一致性指标(D)为 0.80~0.99, 决定系数(R^2)为 0.75~1.00。2)气溶胶使得太阳直接辐射降低; 降低的趋势主要受气溶胶的净辐射通量的影响。2001—2014 年期间北京、香河和太湖总辐射量分别降低 31.95%、14.74%和 28.30%。3)气溶胶直接辐射效应造成玉米减产。2001—2014 年期间气溶胶直接辐射效应使得北京、香河和太湖玉米产量分别减少 28.44%、14.89%和 13.43%。总体来说, 2001—2014 年期间大气气溶胶直接辐射效应使得我国北京、香河和太湖 3 个高污染区的玉米产量减少 13.43%~28.44%。

关键词: 气溶胶; 直接辐射效应; 玉米产量; APSIM 模型; 6S 辐射传输模式

中图分类号: S513

文章编号: 2096-6237(2019)07-0994-10 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Assessment of the direct radiation effect of atmospheric aerosol on maize yield in China by using APSIM model*

KONG Xiangna[1,2], ZHAO Junfang[2**], XU Hui[2], XU Jingwen[1]

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Owing to the increasingly serious atmospheric aerosol pollution, the impact of aerosols on the growth and development of crops can no longer be ignored. In this paper, the Beijing, Xianghe, and Taihu stations in China with perennial obser-

* 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2017R001)和国家重点研发计划项目(2017YFA0603004)资助
** 通信作者: 赵俊芳, 主要从事农业气象、全球变化、碳循环等研究。E-mail: zhaojfcams@163.com
孔祥娜, 主要从事农业气象、病虫害识别等研究。E-mail: 1263321300@qq.com
收稿日期: 2018-12-10 接受日期: 2019-03-13

* This study was supported by the Basic Research Funds-regular of Chinese Academy of Meteorological Sciences (2017R001) and the National Key Research and Development Program of China (2017YFA0603004).
** Corresponding author, E-mail: zhaojfcams@163.com
Received Dec. 10, 2018; accepted Mar. 13, 2019

vation data in global aerosol monitoring network (AErosol RObotic NETwork, AERONET) were used as the research stations. Based on the AERONET data, MODIS surface albedo data and the 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) radiation transfer model, the effects of aerosol direct radiation at three research stations from 2001 to 2014 were calculated. Then, the applicability of the APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) model was evaluated, and the impacts of direct aerosol radiation on maize yield in China were analyzed by using the APSIM model. The results showed that: 1) the verified APSIM maize model had good applicability in the maize producing areas of Beijing, Xianghe, and Taihu in China. The results of APSIM model were a better simulation of the developmental stages and the yield of maize, in which normalized root mean square error (NRMSE), coincidence indicator (*D*), and determinate coefficient (R^2) were 1.55%–6.24%, 0.80–0.99, and 0.75–1.00, respectively. 2) Aerosols reduced direct solar radiation, and the decreasing trend was mainly affected by the net radiation flux of aerosols. The total solar radiation of Beijing, Xianghe, and Taihu stations reduced by 31.95%, 14.74% and 28.30%, respectively, from 2001 to 2014. 3) The direct radiation effect of aerosols caused a reduction in maize yield. The maize yields of the Beijing, Xianghe, and Taihu stations, caused by the direct radiation effect of aerosols, were reduced by 28.44%, 14.89%, and 13.43%, respectively, from 2001 to 2014. In general, because of the direct radiation effects of atmospheric aerosols, the maize yields from 2001 to 2014 were reduced by 13.43%–28.44% in three highly polluted areas (Beijing, Xianghe, and Taihu) in China.

Keywords: Aerosol; Direct radiation effect; Maize yield; APSIM model; 6S radiation transfer model

大气气溶胶一般指的是大气中 0.001~100 μm 包括固态和液态的颗粒物质。气溶胶的成分、来源途径多样, 主要可分为自然和人为两大途径, 其中海盐和灰尘主要由自然中的海洋、土壤和火山等产生, 硫酸盐类、硝酸盐类、铵盐类以及黑碳气类等由人为化学燃烧产生[1-3]。气溶胶辐射效应是由气溶胶直接或间接所引起的辐射通量的变化[4]。气溶胶辐射效应可分为直接、间接或半直接辐射效应, 气溶胶直接辐射效应是指气溶胶通过散射或吸收太阳辐射和红外辐射影响辐射传输, 其中不涉及与任何其他过程的相互作用, 称为气溶胶的直接强迫; 间接辐射效应是指气溶胶通过充当云凝结核改变云性质引起辐射变化; 半直接辐射效应是指气溶胶吸收太阳辐射引起大气增温使得云蒸发, 减少云量从而引起辐射变化[5]。一方面气溶胶吸收、散射太阳辐射使得地面接收的太阳辐射减少形成地面的“冷却”效应, 另一方面气溶胶吸收太阳辐射使得自身温度升高形成“增温”效应, 所以气溶胶辐射效应总体来说是一个降低地表温度、升高大气温度的复杂过程[6]。

随着我国工业的发展, 大气中气溶胶的比重越来越大, 对太阳辐射的影响越来越不可忽视[7]。而农作物生长发育过程中, 一方面作物绝大部分干物质是靠太阳辐射中的光合作用得到的, 气溶胶会减少太阳辐射, 同时气溶胶形成的叶面干沉降增多, 会减少作物接收的光合有效辐射(太阳辐射中能被植物用来光合作用的部分, RAP)[8], 在长江三角区, 作物生长的两个月期间气溶胶使RAP减少35%[9]。除气溶胶干沉降外, 较低浓度的气溶胶湿沉降有利于作物生长, 但较高浓度的气溶胶湿沉降也会降低作物生长[10]。另一方面太阳辐射的减少也会引起最高温度降低, 最低温度增加。人为气溶胶在中国发达地区的冬季夜间温度增加了0.7 ℃, 日平均温度范围降低0.7 ℃[11]。IPCC第5次评估报告中指出气候变化对粮食产量的影响主要为不利影响, 会引起小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)等产量下降[12]。气溶胶变化又影响着气候变化, 因此大气气溶胶对作物的生长发育有着不可忽视的影响, 已经成为近年来的研究热点[13-18]。王力[19]用DNDC模型模拟气溶胶对在太阳辐射、温度等气候因子影响下的2003—2014年华北地区冬小麦发育期及产量变化的影响; 张建平等[20]用WOFOT作物模型分析未来气候变化对不同成熟时期东北玉米产量的影响, 其中东北中熟玉米产量平均减产3.5%, 晚熟玉米产量平均减产2.1%; Greenwald等[21]通过CERES模型模拟在不同条件下气溶胶对小麦、玉米等作物的影响, 在理想状态下玉米产量变化–10%, 小麦产量变化±5%, 水稻产量变化±10%; Gupta等[22]针对1981—2009年间印度208个地区进行气溶胶影响下温度和太阳辐射变化对小麦产量影响的研究, 发现太阳辐射每增加1%, 小麦产量增加1%, 其中太阳辐射的对数与最高温度的相关性为0.38, 与最低温度相关性为–0.39, 因此可以不考虑太阳辐射对温度的影响。目前我国针对高污染区的气溶胶直接辐射效应, 尤其是高污染区的气溶胶直接辐射对农业产量方面研究还较少。本研究利用全球气溶胶监测网(AErosol RObotic NETwork, AERONET)多年观测资料以及MODIS地表反照率数据, 借助6S(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum)辐射传输模式

反演气溶胶数据，运用APSIM (Agricultural Production Systems Simulator)模型评估2001—2014年我国北京、香河和太湖3个典型气溶胶高污染站点的气溶胶直接辐射效应对玉米产量的影响，以期对该地区的大气环境监测、污染治理以及气候变化对农业影响评估等提供理论支持。

1 研究材料与方法

1.1 研究区域介绍

本研究选取高污染区域的 3 个典型 AERONET 站点：北京、香河和太湖，具体见图 1。北京和香河位于我国 6 个玉米种植区中黄淮平原春夏播玉米区，该地区属于暖温带半湿润气候类型，水资源丰富；太湖位于南方丘陵玉米区，该地区属亚热带和热带湿润气候，一年四季都可种植玉米。

1.2 数据来源

1.2.1 气溶胶数据

气溶胶数据来源于 AERONET，该网站提供 3 个级别的数据：1.0 级(未筛选)、1.5 级(经过云筛选)、2.0 级(经过云筛选并有质量保证)。本研究所采用数据为 2.0 级气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)数据，该数据是通过 CE-318 型太阳光度计直接测得，其精度在 0.01~0.02。北京、香河和太湖 3 个 AERONET 站点的相关信息及观测时段如表 1 所示。

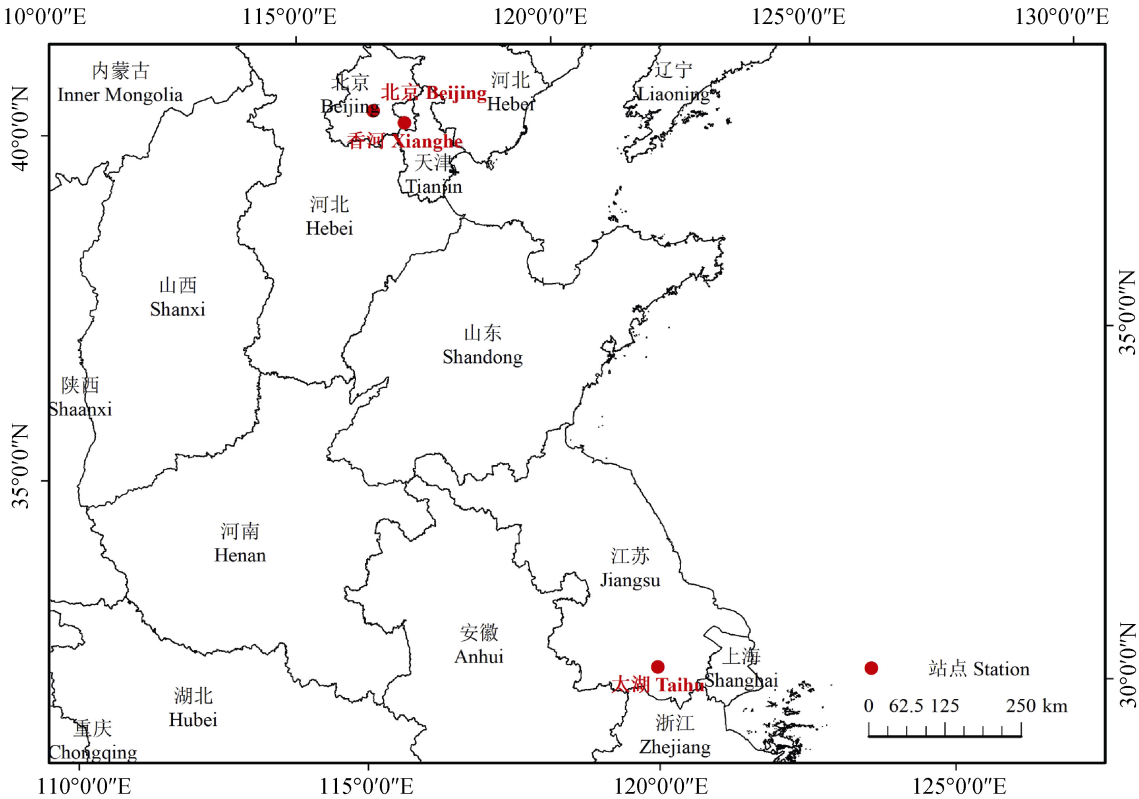

图 1 研究站点分布

Fig. 1 Locations of the research stations

1.2.2 MODIS 数据和地表反照率数据

MODIS 的工作波段涵盖了 0.553~14.235 μm 范围内的可见光、近红外和红外的 36 个波段。目前运行的 2 个 MODIS 传感器分别搭载在 Terra 和 Aqua 卫星平台上，提供了包括 AOD 产品 MOD04(MODIS/Terra)和 MYD04 (MODIS/Aqua)2 种主要气溶胶数据产品。本研究采用质量控制的 2.0 级产品 MOD04 和 MYD04 气溶胶数据。该产品含有 550 nm 通道处的 AOD 值，空间分辨率约为 10 km。

表 1 研究区域相关的全球气溶胶监测网(AERONET)站点信息

Table 1 Information of stations of AErosol RObotic NETwork relative to the study areas

站点 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	观测时段(年-月) Observation period (year-month)
北京 Beijing	116.38°E	39.98°N	92	2001-03—2016-12
香河 Xianghe	116.96°E	39.75°N	36	2001-03—2016-12
太湖 Taihu	120.22°E	31.42°N	20	2005-09—2016-08

本研究所用的地表反照率数据来源于MODIS的MCD43地表反照率产品。MCD43共分500 m、1 km和0.05°气候网格等3种空间分辨率(分别编号A、B和C), 提供BRDF模型参数、BRDF反演质量、反照率和BRDF校正后的天底反射率NBAR(nadir BRDF-adjusted reflectance)等4种产品(依次编号1-4), 其中, 反照率产品提供MODIS 1-7通道和可见光(VIS, 0.3~0.7 μm)、近红外(NIR, 0.7~5.0 μm)和短波(SW, 0.3~5.0 μm)等3个宽波段的黑空反照率(black-sky albedo, BSA)和白空反照率(white-sky albedo, WSA)[23]。研究数据为空间分辨率0.05°、正弦投影的MCD43地表反照率产品。

1.2.3 APSIM 模型驱动数据

APSIM 模型需要运用到 2001—2014 年逐日气象数据(包括太阳辐射、最高气温、最低气温、降雨量)、作物数据(包括玉米播种时间、出苗日期、开花日期、成熟日期、产量)、土壤数据(包括土壤容重、pH 等)。其中逐日气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网, 作物数据来源于国家气象信息中心农业气象观测报表, 土壤数据来源于中国气象局农业气象观测站。

1.3 基于 6S 辐射传输模式的气溶胶直接辐射效应模拟

6S辐射传输模型主要用来模拟无云(晴空)天气条件下, 在太阳反射波段(0.25~4.0 μm)卫星传感器理论上应接收到的辐射值, 不但能较合理地处理空气分子和气溶胶的散射和吸收, 而且还能产生连续光谱[23]。本研究采用6S辐射传输模式模拟到达地球表面向下辐射通量。基于AERONET的AOD小时数据获取AOD日均值数据。分别输入AERONET的AOD小时数据、Terra或Aqua的AOD数据, 以及地表反照率数据, 使用6S辐射传输模型进行地表的辐射通量密度和气溶胶直接辐射效应的模拟。在模拟试验中, 以小时为时间间隔, 获取气溶胶直接辐射效应的日变化, 最后对小时的气溶胶直接辐射效应进行积分, 获取有气溶胶和无气溶胶存在时辐射通量变化的日均值。晴空条件下地表(SFC)气溶胶直接辐射效应指在晴空条件下, 地面短波辐射通量在分别考虑气溶胶存在和不考虑气溶胶存在时两者间的差值, 即:

$$\Delta F_{\mathrm{SFC}} = F(a)_{\mathrm{SFC}} - F_{\mathrm{SFC}'} \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{SFC}} = F_{\mathrm{SFC}}\downarrow - F_{\mathrm{SFC}}\uparrow \tag{2}$$

式中: ΔF_{SFC}表示地表的气溶胶直接辐射效应; $F(a)_{\mathrm{SFC}}$表示地表有气溶胶时的净辐射通量; $F_{\mathrm{SFC}'}$表示地表没有气溶胶时的净辐射通量; $F_{\mathrm{SFC}}\downarrow$、$F_{\mathrm{SFC}}\uparrow$分别表示地表向下和向上方向的辐射通量, F_{SFC}表示地表的净辐射通量。大气气溶胶直接辐射效应值可正可负, 取决于气溶胶粒子自身反射和对太阳辐射吸收的相对能力以及地面反照率等因素。

日均气溶胶直接辐射效应为一天内的瞬时辐射效应的平均值, 即:

$$\overline{\Delta F_{\mathrm{SFC}}} = \frac{1}{T_{\mathrm{day}}}\int_{T_{\mathrm{sunrise}}}^{T_{\mathrm{sunset}}} \Delta F_{\mathrm{SFC}}\left[\theta^{\mathrm{o}}(t), \tau(t)\right] dt \tag{3}$$

式中: $\overline{\Delta F_{\mathrm{SFC}}}$为日均气溶胶直接辐射效应, T_{day}为一天中的总小时数(24 h), T_{sunrise}和 T_{sunset}分别表示日出和日落的时间, θ°为太阳天顶角, τ 表示气溶胶光学厚度。

1.4 APSIM 模型简介

APSIM 模型是由澳大利亚的联邦科工组织以及昆士兰州政府的农业生产系统组(APSRU)受 DSSAT 模型影响所开发建立的优秀作物模型[24]。APSIM 模型在 DSSAT 等模型的基础上进行了创新, 在世界上的应用广泛[24]。该模型主要包括作物、土壤和管理 3 大模块, 在模块中可以模拟土壤水分、碳、氮和磷的变化以及它们之间的相互作用, 同时也可以模拟出气候对作物生长发育以及产量的影响[25]。到目前, APSIM 模型已经发展成一个包含超过 80 个模型框架的作物模型[26]。我国自 2000 年起, 对 APSIM 模型的应用研究渐趋增多, 其中的各子模型都进行了本土化的发展, 主要集中在气候评估和农业生产资源管理上[18,27]。但基于 APSIM 模型识别气溶胶辐射效应对我国玉米产量的影响研究还处于空白。

1.5 APSIM 模型适应性评价

采用"试错法"对玉米品种参数加以调试和验证, 使模拟值与实测值之差尽可能的小, 从而验证模型在各站点的适用性。本模型适应性评价指标包括: 模型模拟值与实测值之间的决定系数(R^2)、一致性指标(D 指标)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和相对均方根误差(NRMSE)。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{N}} \tag{4}$$

$$\mathrm{NRMSE} = \frac{\mathrm{RMSE}}{O} \times 100\% \tag{5}$$

$$D = \frac{\sum (S_i - O_i)^2}{\sum (|O_i - O| + |S_i - O|)^2} \tag{6}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum |S_i - O_i|}{N} \tag{7}$$

式中: S_i为模拟值; O_i为实测值; O 为实测平均值; N

为样本数; RMSE 为模拟值与实测值之间的均方根误差, 值越小, 表明模拟值与实际观测值的偏差越小; NRMSE 为模拟值与实测值之间的相对均方根误差, 控制在 10%以内说明模型的模拟有较高精度; R^2 和 D 指标可反映模拟值与实测值之间的一致性, 对系统模拟误差的响应更敏感, 其值愈接近 1 说明模拟效果愈好; MAE 为平均绝对误差。Ma 等[28]认为 R^2>0.80, D>0.7 时, 模拟结果较好。

根据"试错法"最终确定北京、香河和太湖 3 个站点的玉米参数(表 2), 包括出苗到营养生长期结束的积温、开花到成熟的积温、光周期斜率、最大穗粒数和灌浆速率。

表 2 3 个研究站点玉米的 APSIM 参数

Table 2 Parameters of APSIM for maize at the three stations

站点 Station	出苗到营养生长期结束所需积温 Accumulated temperature from emergence to end of vegetative growth period (℃·d)	开花到成熟所需积温 Accumulated temperature from flowering to maturity (℃·d)	最大穗粒数 Maximum grain numbers per head	灌浆速率 Grain filling rate ($g \cdot d^{-1}$)	光周期斜率 Photoperiods slope ($℃ \cdot h^{-1}$)
北京 Beijing	130	625	800	10.5	5
香河 Xianghe	145	600	850	9.5	5
太湖 Taihu	180	1 000	850	9.4	7

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型适应性

表 3 和图 2 给出了北京、香河和太湖 3 个站点玉米品种完成 3 个发育阶段(播种—出苗、播种—开花和播种—成熟)所需要天数和产量, 及 APSIM 模型模拟的各指标的验证评价情况。总体表明: 上述 3 个发育阶段模拟天数与实测天数基本吻合, 产量的模拟值和实测值也基本一致。由表 3 可知: 3 个站点的玉米出苗期和开花期的模拟值与实测值一致性较好, 出苗期和开花期均方根误差 RMSE 范围分别为 0~1.83 和 1.7~1.83, 误差较小; 相对均方根误差 NRMSE 范围分别为 0~15.06%和 2.11%~3.49%, 其中开花期的 NRMSE 控制在 5%以内, 模拟的精度较高; D 指标范围分别为 0.65~1 和 0.66~0.83, 均接近于 1, 则实测值与模拟值有较高的一致性, 模拟效果较好。播种到成熟时期的模拟除香河的 R^2 为 0.43, 其余站点指标结果都表现良好。图 2 和表 3 玉米产量的模拟值与实测值比较可知: 3 个气象站点玉米产量模拟值与实测值一致性良好, NRMSE 范围均控制在 10%以内, 说明模拟的精度较高; D 指标大体范围为 0.80~0.99; R^2 在 0.75~1.00, 说明该模型模拟的玉米产量结果较好。玉米发育期和产量的模拟值和实测值的一致性, 说明 APSIM 模型能够较为准确地模拟各站点玉米的生长发育和产量形成过程。

表 3 APSIM 模型在 3 个研究站点对玉米生育期和产量模拟的验证结果

Table 3 Verification results of APSIM model for maize growth period and yield at three stations

站点 Station	项目 Item	验证评价指标 Validation index				
		RMSE	D	MAE	NRMSE (%)	R^2
北京 Beijing	播种到出苗天数 Days from sowing to emergence	1.15	0.65	0.67	15.06	0.57
	播种到开花天数 Days from sowing to flowering	1.83	0.70	1.33	3.49	0.99
	播种到成熟天数 Days from sowing to maturity	0.82	0.88	0.67	0.90	0.89
	产量 Yield	226.48	0.80	216.68	3.62	0.75
香河 Xianghe	播种到出苗天数 Days from sowing to emergence	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
	播种到开花天数 Days from sowing to flowering	1.73	0.66	1.67	3.37	1.00
	播种到成熟天数 Days from sowing to maturity	1.91	0.74	1.67	1.95	0.43
	产量 Yield	479.15	0.85	379.00	6.24	0.90
太湖 Taihu	播种到出苗天数 Days from sowing to emergence	1.83	0.91	1.33	10.33	0.96
	播种到开花天数 Days from sowing to flowering	1.73	0.83	1.67	2.11	0.62
	播种到成熟天数 Days from sowing to maturity	2.94	0.52	2.67	2.31	0.85
	产量 Yield	113.37	0.99	79.07	1.55	1.00

RMSE: 均方根误差; D: 一致性指标; MAE: 平均绝对误差; NRMSE: 相对均方根误差; R^2:决定系数。RMSE: root mean square error; D: coincidence indicator; MAE: mean absolute error; NRMSE: normalized root mean square error; R^2: determinate coefficient.

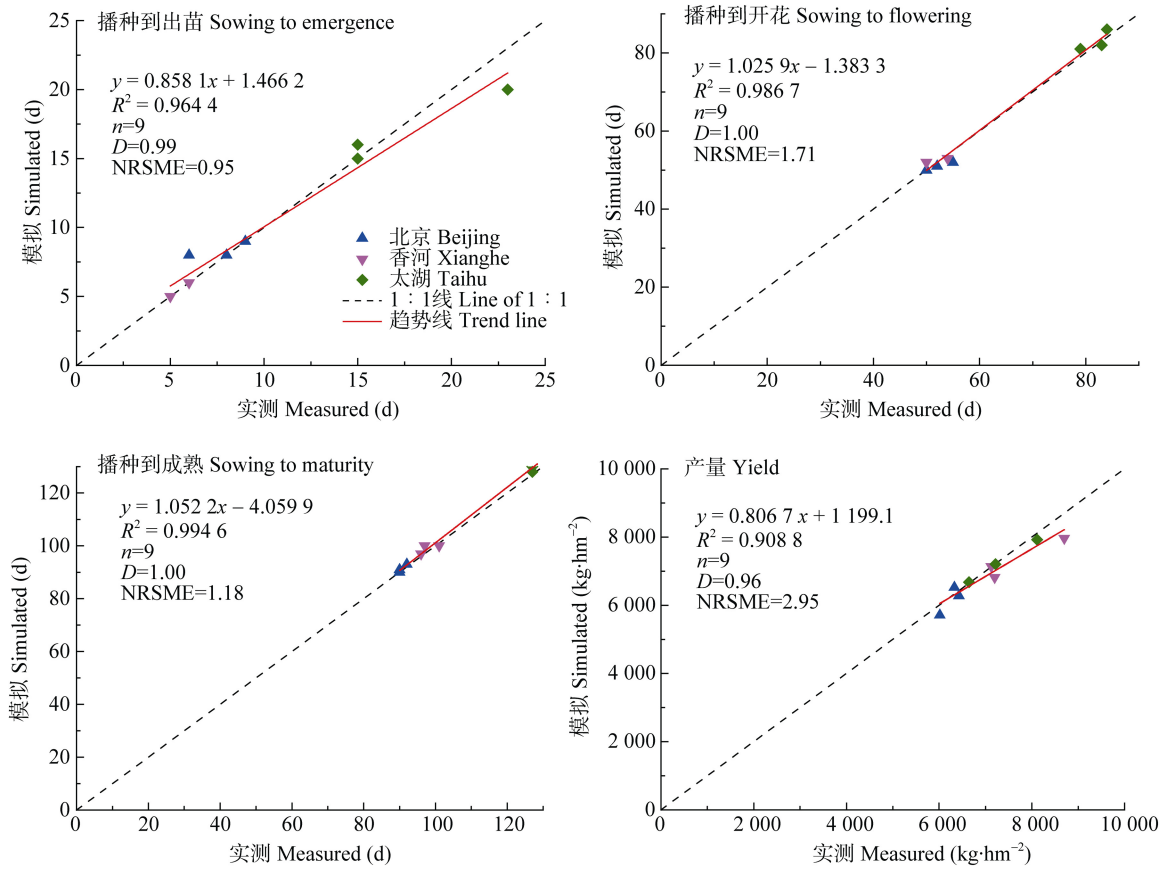

图 2　3 个研究站点玉米发育期、产量实测值和模拟值结果对比

Fig. 2　Comparison between measured and simulated phenology and yield of maize at three stations

2.2　气溶胶的地表直接辐射效应

根据已有的气象资料和气溶胶的完整度确定用于 APSIM 模型模拟气溶胶直接辐射效应对于玉米产量影响的时间段为北京 2002 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日、香河 2005 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日、太湖 2006 年 1 月 1 日—2012 年 12 月 31 日。图 3 为北京、香河和太湖各研究时间段内年平均辐射量的变化, 3 个站点在无气溶胶时的净辐射通量变化不明显, 较为稳定。太湖站点的净辐射通量最大, 北京次之, 香河最小。太湖站点的净辐射通量范围为 853.38~865.80 W·m^{-2}, 平均值为 858.75 W·m^{-2}(图 3c); 北京和香河的净辐射通量相差不大, 范围分别为 650.96~671.68 W·m^{-2}、620.85~621.97 W·m^{-2}, 平均值分别为 656.76 W·m^{-2}、621.56 W·m^{-2}(图 3a、b)。

在气溶胶的影响下, 香河净辐射通量变化最大, 北京次之, 太湖最小。北京站点 2002—2007 年间的净辐射通量变化较大, 变化范围为 389.05~575.69 W·m^{-2}, 2008—2014 年的变化较为缓慢, 变化范围为 427.18~451.54 W·m^{-2}(图 3a); 香河站点 2005—2009 年间的净辐射通量变化较大, 变化范围为 416.81~582.66 W·m^{-2}, 2010—2014 年的变化较为缓慢的逐年增加, 变化范围为 546.50~603.11 W·m^{-2}(图 3b); 太湖站点的总体变化较为平缓, 范围在 583.59~634.55 W·m^{-2}(图 3c), 在研究时间段内的后期净辐射通量变化趋于平稳。

由图 3 和表 4 中气溶胶直接辐射效应全部为负值可知气溶胶会引起太阳辐射的减少。气溶胶直接辐射效应是有气溶胶和无气溶胶影响下净辐射通量的差值, 其中无气溶胶影响下的净辐射通量的变化趋势平稳, 所以气溶胶直接辐射效应的变化受气溶胶影响下的净辐射通量的变化影响较大。图 3 中气溶胶直接辐射效应的变化趋势与气溶胶影响下的净辐射通量的变化趋势基本一致。研究期间内香河站点的气溶胶直接辐射负效应变化最为明显, 北京和太湖的变化较小。其中香河和太湖总体趋势上升, 即气溶胶对太阳辐射的吸收逐渐减弱, 增加趋势分别为 15.98 W·m^{-2}、3.99 W·m^{-2}; 北京总体趋势下降, 下降趋势为 2.21 W·m^{-2}。由表 4 可知气溶胶会降低太阳辐射, 北京站点下降的比例最多, 其次是太湖, 香河最少。其中北京降低 14.29%~40.56%, 平均降低 31.95%; 香河降低 2.93%~32.96%, 平均降低 14.74%; 太湖降低 22.63%~31.94%, 平均降低 28.30%。

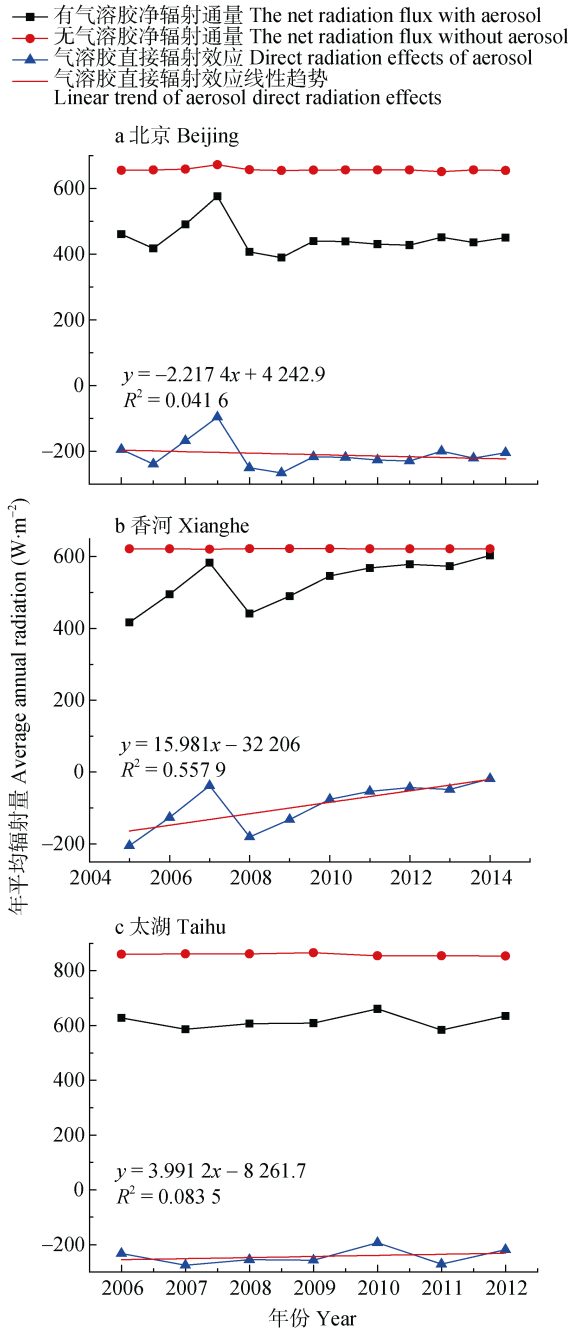

图 3 北京(a)、香河(b)和太湖(c)研究站点的气溶胶直接辐射效应

Fig. 3 Direct radiation effects of aerosol in stations of Beijing (a), Xianghe (b) and Taihu (c)

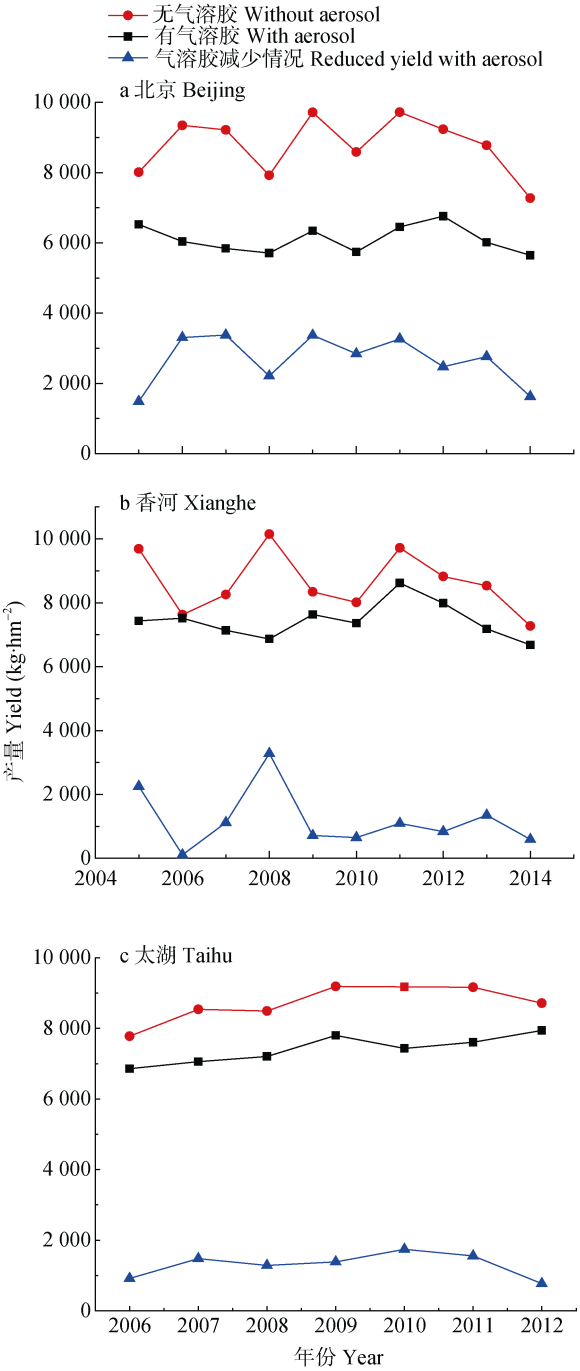

图 4 北京(a)、香河(b)和太湖(c)研究站点有无气溶胶直接辐射效应下玉米产量的变化

Fig. 4 Changes in maize yield with or without effect of direct aerosol radiation at stations of Beijing (a), Xianghe (b) and Taihu (c)

2.3 气溶胶地表直接辐射效应对玉米产量的影响

APSIM 模拟结果表明气溶胶直接辐射效应会使玉米产量降低(图 4 和表 4), 其中 2001—2014 年期间, 北京站点玉米产量减少 1 274.50~3 376.70 kg·hm^{-2} (15.02%~36.63%), 平均减少 2 506.47 kg·hm^{-2}(28.44%); 香河站点玉米产量减少 111.30~3 284.30 kg·hm^{-2} (1.47%~32.36%), 平均减少 1 200.45 kg·hm^{-2}(13.43%); 太湖站点玉米产量减少 770.30~1 741.90 kg·hm^{-2} (8.84%~18.99%), 平均减少 1 308.84 kg·hm^{-2}(14.89%)。

3 讨论与结论

本研究结果表明北京、香河和太湖的气溶胶直接辐射效应为负效应, 使得 3 个研究站点在研究时间段内的太阳辐射平均值分别减少 31.95%、14.74%和 28.30%, 其中香河和太湖站点的气溶胶直接辐射效应在研究后期有减少趋势, 但是趋势较弱, 这与 Chameides 等[29]研究得到的气溶胶会使达地球表面的太阳辐射

表 4　3 个研究站点在气溶胶影响下的太阳辐射和玉米产量变化

Table 4　Changes in solar radiation and maize yield caused by aerosols in three stations

站点 Station	年份 Year	气溶胶直接辐射变化 Change of aerosol direct radiation		玉米产量变化 Change of maize yield	
		辐射量 Radiation ($W \cdot m^{-2}$)	变化率 Change rate (%)	产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	变化率 Change rate (%)
北京 Beijing	2002	−194.11	−29.65	−2 089.80	−23.02
	2003	−238.46	−36.34	−2 497.70	−31.10
	2004	−167.53	−25.45	−1 274.50	−15.02
	2005	−96.00	−14.29	−1 486.70	−18.56
	2006	−249.97	−38.07	−3 307.40	−35.39
	2007	−265.52	−40.56	−3 376.70	−36.63
	2008	−216.07	−32.95	−2 211.30	−27.91
	2009	−217.95	−33.21	−3 371.20	−34.71
	2010	−226.00	−34.44	−2 843.80	−33.12
	2011	−229.14	−34.91	−3 262.80	−33.58
	2012	−199.42	−30.63	−474.70	−26.80
	2013	−220.67	−3.63	−2 760.00	−31.45
	2014	−204.29	−31.22	−1 627.50	−22.38
香河 Xianghe	2005	−204.91	−32.96	−2 253.20	−23.26
	2006	−126.33	−20.32	−111.30	−1.46
	2007	−37.75	−6.08	−1 118.50	−13.54
	2008	−180.26	−28.99	−3 284.30	−32.36
	2009	−131.95	−21.22	−711.90	−8.53
	2010	−75.46	−12.13	−650.20	−8.11
	2011	−53.47	−8.60	−1 097.00	−11.29
	2012	−43.03	−6.92	−834.60	−9.46
	2013	−48.29	−7.77	−1 354.50	−15.87
	2014	−18.23	−2.93	−591.20	−8.13
太湖 Taihu	2006	−232.74	−27.06	−918.80	−11.81
	2007	−275.19	−31.94	−1 479.90	−17.33
	2008	−255.10	−29.60	−1 286.70	−15.16
	2009	−257.43	−29.73	−1 385.30	−15.08
	2010	−193.26	−22.63	−1 741.90	−18.99
	2011	−271.09	−1.72	−1 558.00	−17.00
	2012	−218.83	−25.45	−770.30	−8.84

减少 30%结论相似，与张志薇等[30]的研究结果相似。气溶胶辐射效应引起的北京、香河和太湖站点的玉米产量分别减少 28.44%、13.43%和 14.89%，这与 Greenwald 等[21]得出的气溶胶量增加会引起玉米产量减少的结论相似。本文气溶胶直接辐射效应会引起北京、香河和太湖地区玉米减产的结论与前人的研究一致，但是比张建平等[20]研究的气溶胶使东北玉米减产率要高。

本研究中对研究区气溶胶地表直接辐射效应对玉米产量的影响评估还存在一定的不确定性：1)从 AERONET 网站获取的 AOD 数据计算出气溶胶直接辐射效应数据在研究时间段内有部分天数缺失，针对不同的数据补全方法所获得的数据有差异，从而计算出来的气溶胶直接辐射效应对玉米产量的影响也会有所差异。本文采用的数据插补方法是时间序列气象插值算法，通过编制和分析时间序列上气象站点的规律或趋势预测缺失的气溶胶直接辐射数据。2)本研究的内容是基于 APSIM 模型的气溶胶直接辐射效应对玉米产量的影响，其中 APSIM 模型模拟过程中所需要的参数较多，部分参数的获取较为困难，且现实情况中影响玉米产量的因素众多，关系复杂，而模型并不能完全考虑各种因素，所以基于模型模拟的结果与实际情况有一定的差异。3)气溶胶除了会引起太阳辐射变化外同时还会引起其他气象因素变化，本研究只讨论了气溶胶直接影响下太阳辐射变化对玉米产量的影响，暂未讨论气溶胶间接引起的

其他气象因素变化对玉米产量的影响。在后续的相关研究中需同时考虑气溶胶直接和间接影响下多种气象因素变化对玉米产量的影响。

本研究利用全球气溶胶监测网 AERONET 多年观测资料以及 MODIS 地表反照率数据, 借助 6S 辐射传输模式反演气溶胶数据, 运用 APSIM 作物模型评估 2001—2014 年我国北京、香河和太湖 3 个典型气溶胶高污染站点的气溶胶直接辐射效应对玉米产量的影响, 结果表明:

1)验证后的 APSIM 玉米模型在我国北京、香河和太湖玉米产区具有较好的适用性。从 APSIM 模型模拟整体情况看, 3 个站点玉米的发育期及产量的 NRMSE 为 0.95%~2.95%, D 为 0.91~0.99, R^2 为 0.96~1.00。其中在产量模拟中, 北京 NRMSE 为 3.62%, D 为 0.80, R^2 为 0.75; 香河 NRMSE 为 6.24%, D 为 0.85, R^2 为 0.90; 北京 NRSME 为 1.55%, D 为 0.99, R^2 为 1.00。

2)研究时间段内 3 个站点在无气溶胶影响的净辐射通量数据较为平稳, 气溶胶直接辐射效应的变化主要受气溶胶影响下的净辐射通量的影响。气溶胶直接辐射值为负值表明气溶胶会使得大气内的太阳直接辐射降低, 其中北京站点下降比例最多, 平均下降 31.95%; 其次是太湖, 平均下降 28.30%; 香河最少, 平均下降 14.74%。

3)气溶胶直接辐射效应会降低玉米的产量。其中, 北京站点平均减少 2 506.47 kg·hm^{-2}(28.44%), 香河站点平均减少 1 200.45 kg·hm^{-2} (13.43%), 太湖站点平均减少 1 308.84 kg·hm^{-2}(14.89%)。3 个站点产量减少的比例大小与气溶胶造成的太阳直接辐射的减少比例大小相似, 都是北京减少最多, 其次是太湖, 香河最小。

参考文献 References

[1] NAEGER A R. Impact of dust aerosols on precipitation associated with atmospheric rivers using WRF-Chem simulations[J]. Results in Physics, 2018, 10: 217–221

[2] 张美根, 韩志伟. TRACE-P 期间硫酸盐、硝酸盐和铵盐气溶胶的模拟研究[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 1–6
ZHANG M G, HAN Z W. A numerical study on distribution of sulfate, nitrate and ammonium aerosols over east Asia during the TRACE-P campaign[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(1): 1–6

[3] 郑辉辉, 师华定, 陈莉荣, 等. 典型行业黑碳气溶胶排放对区域气候的影响模拟[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(3): 255–261
ZHENG H H, SHI H D, CHEN L R, et al. Simulation of impact of black carbon aerosol on regional climate change in typical industries[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(3): 255–261

[4] 李德平, 程兴宏, 孙治安, 等. 北京不同区域气溶胶辐射效应[J]. 应用气象学报, 2018, 29(5): 609–618
LI D P, CHENG X H, SUN Z A, et al. Radiative effects of aerosols in different areas of Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29(5): 609–618

[5] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 576–578

[6] XIA X, CHE H, ZHU J, et al. Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: Aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization[J]. Atmospheric Environment, 2016, 124: 243–251

[7] 王志立. 典型种类气溶胶的辐射强迫及其气候效应的模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011: 131–135
WANG Z L. Simulation of radiative forcing of typical aerosols and their effects on climate[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011: 131–135

[8] 刘秀位, 张小雨, 张喜英. 大气气溶胶增加对作物的影响研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 2084–2090
LIU X W, ZHANG X Y, ZHANG X Y. A review of the research on crop responses to the increase in aerial aerosol[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 2084–2090

[9] BERGIN M H, GREENWALD R, XU J, et al. Influence of aerosol dry deposition on photosynthetically active radiation available to plants: A case study in the Yangtze Delta Region of China[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(18): 3605–3608

[10] CHEN Y P. Ecophysiological responses of winter wheat seedling to aerosol wet deposition of Xi'an area, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(11): 1786–1791

[11] HUANG Y, DICKINSON R E, CHAMEIDES W L. Impact of aerosol indirect effect on surface temperature over East Asia[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(12): 4371–4376

[12] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group Ⅱ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 491–492

[13] CHARLSON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. Science, 1992, 255(5043): 423–430

[14] BOIYO R, KUMAR K R, ZHAO T L. Statistical intercomparison and validation of multisensory aerosol optical depth retrievals over three AERONET sites in Kenya, East Africa[J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 277–288

[15] ZHANG T Y, YUE X, LI T, et al. Climate effects of stringent air pollution controls mitigate future maize losses in China[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(12): 124011

[16] 翟薇. 大气气溶胶辐射效应对长江三角洲地区主要作物生产的影响[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007: 1–11
ZHAI W. The impacts of radiative effects of atmospheric aerosol

on primary crops' growth in the Yangtze Delta region[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2007: 1–11

[17] 任义方, 王春乙, 赵艳霞. 气溶胶辐射效应对作物及生态系统的影响综述[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 533–540
REN Y F, WANG C Y, ZHAO Y X. Review on impact of atmospheric aerosol radiation effect on crops and ecological system[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 533–540

[18] 赵俊芳, 李宁, 候英雨, 等. 基于 APSIM 模型评估北方八省春玉米生产对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2018, 39(2): 108–118
ZHAO J F, LI N, HOU Y Y, et al. Evaluation of response of spring maize production to climate change in the eight provinces of northern China based on APSIM model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(2): 108–118

[19] 王力. 华北地区气溶胶时空分异特性及对农作物影响的模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015: 1–61
WANG L. Atmospheric aerosol spatial-temporal characteristics and its climatic effect on crop in North China[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015: 1–61

[20] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1448–1452
ZHANG J P, ZHAO Y X, WANG C Y, et al. Simulation of maize production under climate change scenario in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1448–1452

[21] GREENWALD R, BERGIN M H, XU J, et al. The influence of aerosols on crop production: A study using the CERES crop model[J]. Agricultural Systems, 2006, 89(2/3): 390–413

[22] GUPTA R, SOMANATHAN E, DEY S. Global warming and local air pollution have reduced wheat yields in India[J]. Climatic Change, 2017, 140(3/4): 593–604

[23] 赵俊芳, 徐慧, 孔祥娜, 等. 基于 MODIS 和 AERONET 的气溶胶地表直接辐射效应评价[J]. 中国农业气象, 2018, 39(11): 693–701
ZHAO J F, XU H, KONG X N, et al. Estimating surface direct radiation effect of aerosol based on MODIS and AERONET data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(11): 693–701

[24] HOLZWORTH D P, HUTH N I, DEVOIL P G, et al. APSIM — Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 62: 327–350

[25] GAYDON D S, BALWINDER-SINGH, WANG E, et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia[J]. Field Crops Research, 2017, 204: 52–75

[26] HOLZWORTH D, HUTH N I, FAINGES J, et al. APSIM next generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 103: 43–51

[27] 赵彦茜, 齐永青, 朱骥, 等. APSIM 模型的研究进展及其在中国的应用[J]. 中国农学通报, 2017, 33(18): 1–6
ZHAO Y X, QI Y Q, ZHU J, et al. Research progress of APSIM model and its application in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(18): 1–6

[28] MA L, AHUJA L R, SASEENDRAN S A, et al. A protocol for parameterization and calibration of RZWQM2 in field research[M]//AHUJA L R, MA L W. Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2011: 1–64

[29] CHAMEIDES W L, YU H, LIU S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls?[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(24): 13626–13633

[30] 张志薇, 王宏斌, 张镭, 等. 中国地区 3 个 AERONET 站点气溶胶直接辐射强迫分析[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(3): 297–305
ZHANG Z W, WANG H B, ZHANG L, et al. Aerosol direct radiative forcing at three AERONET sites in China[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(3): 297–305