

赵彦茜,安 塞,齐永青,等. APSIM 模型在河北山前平原农业耗水研究中的应用[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):282-286.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.071

APSIM 模型在河北山前平原农业耗水研究中的应用

赵彦茜¹, 安 塞², 齐永青³, 朱 骥¹

(1. 河北地质大学, 河北石家庄 050031; 2. 河北科技大学, 河北石家庄 050018;

3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室, 河北石家庄 050021)

摘要:为将 APSIM 模型应用于河北山前平原农业耗水研究中,利用中国科学院栾城农业生态系统试验站 2009—2013 年的数据对 APSIM 模型参数进行调试与验证,并对河北山前平原 1986—2015 年不同降水年型情况下的作物生产和水分消耗状况进行研究。模拟结果表明,APSIM 模型可以较好地模拟河北山前平原冬小麦和夏玉米的产量、蒸散量(evapotranspiration,简称 ET)以及土壤水储量的动态变化,适用于研究分析河北山前平原水资源消耗和产量水平的综合效应。产量模拟结果的均方根误差(root mean square error,简称 RMSE)和确定系数(R^2)分别为 502 kg/hm² 和 0.83,蒸散量 ET 模拟结果的均方根误差和决定系数分别为 30.8 mm 和 0.91,每月蒸散量 ET 模拟结果的均方根误差和决定系数分别为 13.2 mm 和 0.89,模拟效果良好。根据验证结果,然后利用调整之后的参数模拟 1986—2015 年河北山前平原不同降水年型下的作物生产耗水状况,研究说明传统的一年两熟种植制度耗水量较大,不适于在河北山前平原继续推行下去,应该予以调整。

关键词:河北山前平原;APSIM 模型;小麦;玉米;农业耗水;产量;蒸散量

中图分类号: S274.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0282-05

河北山前平原主要是指河北省境内京津以南的河北山前平原,属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,雨热同期,降水主要集中于夏季,适合多种作物生长。

冬小麦—夏玉米一年两熟制是河北山前平原主要的种植制度^[1],但该地区大部分区域的降水量无法满足一年两熟制下作物对水分的要求,原因在于冬小麦生育期内水分亏缺非常严重^[2]。通常情况下,该地区多年平均降水量为 400~550 mm,冬小麦生育期内降水量为 90~130 mm,夏玉米生育期内降水量为 300~360 mm,而冬小麦年平均耗水量为 380~450 mm,夏玉米年平均耗水量则为 270~330 mm^[3-5],冬小麦生育期水分亏缺为 250~320 mm,须要进行多次灌溉来保证

产量,而夏玉米只要适时播种,自然降水可满足其对水分的要求,生育期内基本不须要灌溉或者仅须要灌溉 1 次出苗水,只有在极少的尤其干旱的年份须要进行二次灌溉,以缓解“卡脖子”的影响。河北山前平原作物高产主要是靠提取地下水灌溉来保证,而长期的灌溉已经造成河北山前平原地下水资源的严重亏损,导致河北山前平原地下水位持续下降^[6]。所以,农业生产耗水研究对于供水问题突出的河北山前平原来说十分重要,而应用于这一研究的主要就是进行田间定位试验和利用作物模型模拟这 2 种方法,本研究主要是在已有田间试验资料的基础上应用 APSIM 模型对河北山前平原的农业耗水状况进行研究分析。

作物模型可以在已有研究资料基础上对在多种模拟条件下的作物生长情况进行模拟,预测未知风险,优化农业资源管理措施,为农业生产的管理经营提供科学指导,APSIM 模型就是作物模型中的典型代表。APSIM 模型是一种可用于模拟农业生产系统中各主要组成部分的机制模型,它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(agricultural production systems research unit,简称 APSRU)所开发建立的优秀作物模型^[7-8]。APSIM 模型建立最初的目的是在农业系统里进行长期资源管理试验时,对在气候变化、作

收稿日期:2017-08-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:41001060);国家重点研发计划课题(编号:2016YFC0401403)。

作者简介:赵彦茜(1992—),男,河北南和人,硕士研究生,主要从事资源环境综合信息勘查。E-mail:1014236494@qq.com。

通信作者:齐永青,博士研究生,副研究员,主要从事水资源与农业可持续发展。Tel:(0311)85812827;E-mail:18233181223@163.com。

[2]施 能,黄先香,杨 扬. 1948—2000 年全球陆地年降水量趋势变化的时、空特征[J]. 大气科学,2003,27(6):971-982.

[3]徐 影,丁一汇,李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化[J]. 高原气象,2003,22(5):451-457.

[4]游庆龙,康世昌,李潮流,等. 青藏高原纳木错气象要素变化特征[J]. 气象,2007,33(3):54-60.

[5]郑 然,李栋梁,蒋元春. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象,2015,34(6):1531-1539.

[6]杨 玮,何金海,王盘兴,等. 近 42 年来青藏高原年内降水时空

不均匀性特征分析[J]. 地理学报,2011,66(3):376-384.

[7]赵海珍,李文华,黄瑞玲,等. 拉萨达孜县北京杨人工林生态系统服务功能评价[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(5):104-106.

[8]沈志强,卢 杰,华 敏,等. 西藏拉萨达孜夏季降水日变化特征[J]. 山地学报,2016,34(4):409-414.

[9]屈兴乐,殷文杰,周尧治,等. 拉萨河谷高山灌丛草甸区系组成及其特征[J]. 干旱区研究,2016,33(3):548-553.

[10]沈志强,华 敏,卢 杰,等. 西藏拉萨河谷山地土壤水分对降雨的响应[J]. 中国农村水利水电,2016(10):104-107,115.

物的遗传特征、土壤环境以及管理措施等因子影响下的作物生产力提供一个更准确地预测^[9]。在国外,APSIM 模型关于水资源—产量综合效应和水分利用的研究较多,涉及面积广^[10-13]。Acuña 等利用 APSIM 模型对澳大利亚塔斯马尼亚岛上农业用地的地表水平衡、水分利用效率和小麦产量进行模拟,分析了灌溉、施肥等因素对产量和水分利用效率的影响^[10]。而在国内,关于 APSIM 模型的应用研究也渐趋增多^[14-24]。Sun 等利用 APSIM 模型在华北平原量化灌溉对于地下水和产量的影响^[17]。van Oort 等利用 APSIM 模型模拟了华北平原种植制度变化下地下水的变化情况^[18]。

为研究河北山前平原的农业耗水状况,以中国科学院栾城农业生态系统试验站 2009—2013 年的冬小麦和夏玉米实测资料对 APSIM 模型进行率定和验证,对河北山前平原水资源—产量综合效应进行研究分析。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

中国科学院栾城农业生态系统试验站位于河北省石家庄市栾城区,地处 37°53'N、114°41'E,海拔为 50.1 m。该试验站位于河北平原北部的太行山山前平原,属暖温带半湿润季风气候,年降水量为 400~550 mm,其中 7—9 月为雨季,降水量为 300~360 mm,占年降水量 60% 以上,年均温为 10~13℃,无霜期为 180~230 d,主要作物种植模式为冬小麦—夏玉米一年两熟。

1.2 试验方法

本次试验研究模拟验证时间段为 2009—2013 年,熟制是冬小麦—夏玉米一年两熟制,冬小麦品种为科农 199,夏玉米品种为郑单 958。冬小麦播种日期为 10 月 5—15 日,夏玉米播种日期为 6 月 9—17 日,冬小麦生育期内进行 3~4 次灌溉,夏玉米生育期内进行 0~2 次灌溉。

1.3 模型参数

1.3.1 气象参数 本研究所需的气象参数包括最高气温、最低气温、相对湿度、降水量、日照时数等,均来源于中国科学院栾城农业生态系统试验站田间 Milos520 自动气象站。

1.3.2 土壤参数 APSIM 模型土壤参数主要包括各土层容重(BD)、饱和体积含水量(SAT)、萎蔫系数(LL15)、风干系数(AirDry)等参数(表 1)。

表 1 土壤水分参数

土壤深度 (cm)	土层容重 (g/cm ³)	萎蔫系数 (mm/mm)	风干系数 (mm/mm)	饱和体积含水量 (mm/mm)
0~20	1.41	0.096	0.090	0.433
20~40	1.51	0.114	0.110	0.435
40~60	1.47	0.139	0.135	0.430
60~100	1.51	0.139	0.135	0.448
100~140	1.54	0.130	0.127	0.440
140~160	1.64	0.139	0.135	0.476
160~180	1.59	0.164	0.160	0.447
180~260	1.59	0.164	0.160	0.447

1.3.3 作物参数 作物参数主要是根据田间观测数据来确定,研究中的 APSIM 模型作物属性模块主要包括该研究区域冬小麦和夏玉米品种遗传特性参数、作物生长发育进程、植株形态以及产量形成等相关参数(表 2)。

表 2 冬小麦和夏玉米作物参数

作物	参数	取值
小麦	灌浆到成熟积温(℃·d)	560
	春化敏感性	1.4
	光周期敏感性	2.1
	潜在灌浆速率(g/d)	0.002 7
玉米	开花到成熟积温(℃·d)	650
	最大籽粒数	510
	光周期斜率	22.5
	灌浆速率(g/d)	0.018

1.4 降水年型分类

为研究河北山前平原降水对农业生产的影响,根据栾城站试验区的降水资料对该地区的降水年型进行分类,采用的标准为国内常用的降水保证率分类标准^[25-28]。降水保证率表示降水量某一界限值出现的可靠程度,根据降水保证率将降水年份划分为不同的年型:25% 保证率的降水年份为湿润年,50% 保证率的降水年份作为平水年,75% 保证率的降水年份为干旱年。

1.5 模型检验方法

模型检验方法主要是以下 2 个国际上统一的指标:确定系数 R^2 和均方根误差(root mean square error,简称 RMSE)。计算公式如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2; \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}. \quad (2)$$

式中: O_i 表示实测值; S_i 表示模拟值; \bar{O} 表示实测值的平均值; \bar{S} 表示模拟值的平均值; n 表示试验样本数。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型验证

利用 APSIM 模型对试验区 0~1.8 m 土壤含水量 SWC、产量、蒸散量 ET 等进行模拟,模拟结果表明,SWC 模拟结果的决定系数为 0.79(图 1),冬小麦和夏玉米产量模拟结果的均方根误差和确定系数分别为 502 kg/hm² 和 0.83(图 2),作物蒸散量 ET 模拟结果的均方根误差和决定系数分别为 32.7 mm 和 0.88(图 2),每月蒸散量 ET 模拟结果的均方根误差和确定系数分别为 13.2 mm 和 0.925(图 3)。这些结果表明,APSIM 模型适合应用于研究分析河北山前平原水资源消耗和粮食生产的综合效应。

APSIM 模型对 0.0~1.8 m 的土壤含水量的模拟结果较好。根据实测资料,可以观察到土壤含水量在 1 年中的 7、8 月达到全年最大值,超过 600 mm,之后随着小麦生育期的到来,土壤含水量维持在 450~550 mm 这个略低的水平,APSIM 模型的模拟结果可以将土壤含水量的这一动态变化趋势很清楚地展现出来,对研究农业生产和土壤水动态变化的关系有重要意义。

APSIM 模型在一定程度上可以模拟出气候风险对作物生长的影响以及相应的产量波动,相关性分析拟合精度达

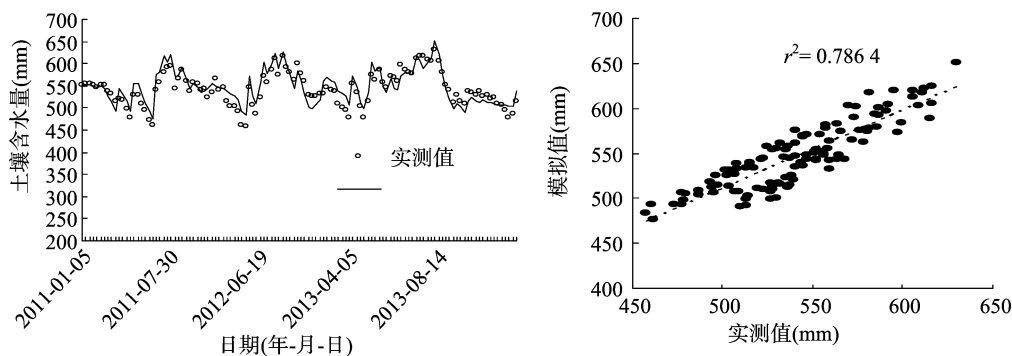


图1 土壤含水量数值模拟效果和相关性分析

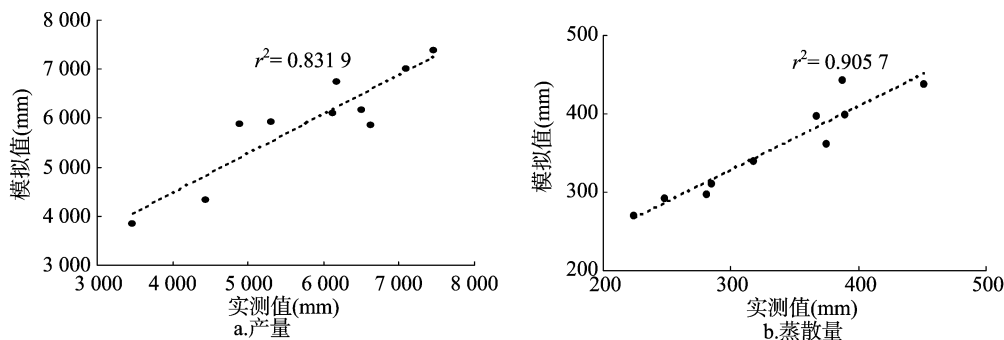


图2 小麦玉米作物产量和蒸散量 ET 相关性分析

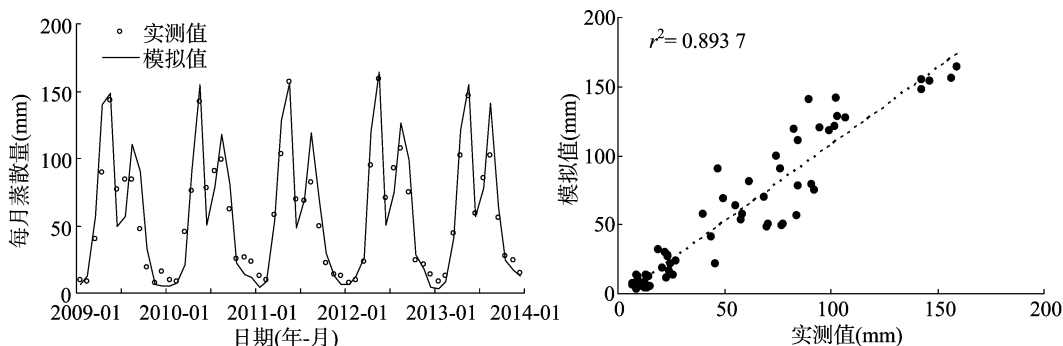


图3 每月蒸散量 ET 数值模拟效果和相关性分析

0.83。冬小麦和夏玉米生育期内蒸散量 ET 的年际变化较为明显,在 APSIM 模型的模拟结果中,这一动态变化模拟得也较为准确,拟合精度达到 0.91。

通过 2009—2013 年的每月蒸散量 ET 实测数据可以发现,冬小麦生育期内月蒸散量 ET 的峰值是在 5 月,夏玉米生育期内月 ET 的峰值是在 8 月,这分别对应的是冬小麦和夏玉米的灌浆期,而月 ET 全年谷值则是在 6 月和冬季月,全年呈现出“两峰一谷”的特点。APSIM 模型的模拟结果非常明显地把这一特点表现出来,确定系数达到 0.89,模拟效果较好。

2.2 河北山前平原 1986—2015 年不同降水年型情况下冬小麦—夏玉米一年两熟制的作物生产耗水分析

根据研究区域 1986—2015 年的降水资料,可以计算出年降水丰水年的分类界限为 570 mm,枯水年分类界限为 400 mm,小麦季丰水年的分类界限为 170 mm,枯水年分类界限为 105 mm,玉米季丰水年的分类界限为 400 mm,枯水年分类界限为 250 mm。根据上述分类标准,可将 1986—2015 年

这 30 年分成丰水年、平水年、枯水年等 3 个类型(图 4)。

根据调整验证后的模型参数,本研究运用 APSIM 模型对河北山前平原 1986—2015 年的农业生产耗水进行模拟(图 5)。小麦生长阶段为每年 10 月 15 日至次年 6 月 14 日,生长阶段内灌溉 4 次,每次灌溉量为 80 mm;玉米生长阶段为每年 6 月 15 日至 10 月 5 日,生长阶段内灌溉 2 次,每次灌溉量为 60 mm。通过模拟研究降水对农业生产的影响,并从全年、小麦生育期、玉米生育期等 3 个角度分析河北山前平原近 30 年的农业生产耗水规律。

根据模拟结果,可计算得出丰水年平均年产量为 13 622 kg/hm²,平水年平均年产量为 13 698.8 kg/hm²,枯水年平均年产量为 12 814 kg/hm²,30 年总平均年产量为 13 444.9 kg/hm²。根据上述验证所用实测数据,这个模拟结果是较为符合实际的。模拟结果表明,平水年和丰水年年产量水平均比较高,枯水年产量水平最低,且丰水年年产量水平略低于平水年,这主要是因为丰水年部分年份降水分配较差或者夏季暴雨集中对作物生产产生了不利影响,例如根据验

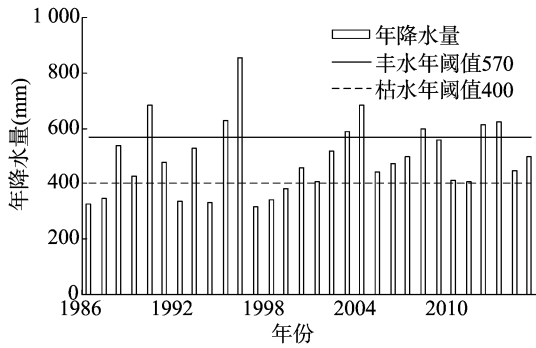
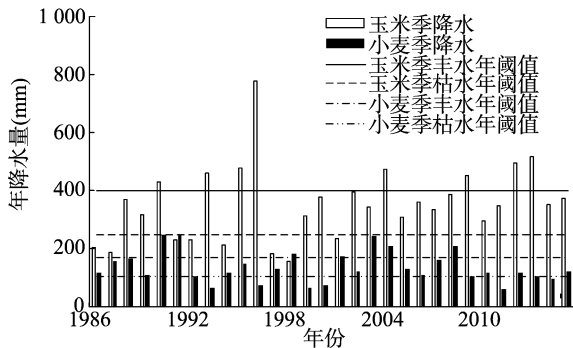


图4 研究区降水量变化趋势

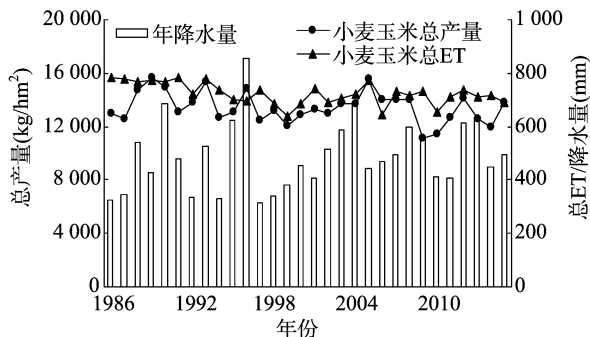


图5 1986—2015 年河北山前平原模拟产量、降水量和模拟 ET

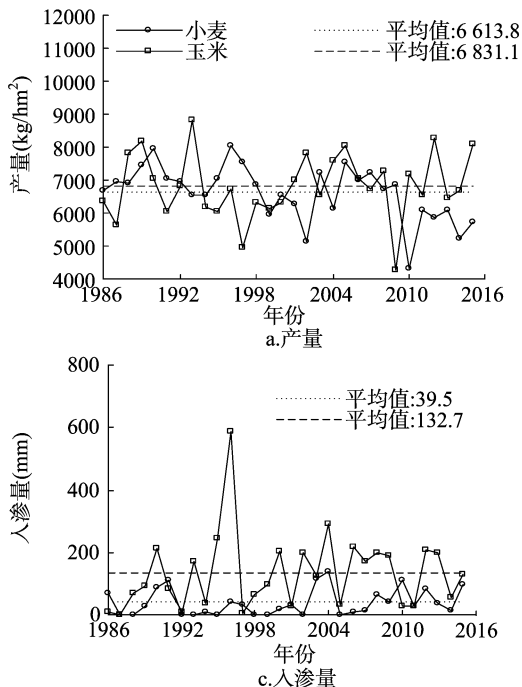


图6 河北山前平原 1986—2015 年小麦—玉米模拟产量、ET、入渗量和水分亏损量对比情况

前平原玉米生育期平均降水量为 354.7 mm,小麦生育期平均降水量为 136.4 mm,河北山前平原降水主要集中在玉米生育期。水分亏损量(水分亏损量 = 蒸散量 - 降水量)是衡量作物耗水的重要指标,小麦生育期内平均水分亏损量远大于玉米生育期内平均水分亏损量(表 3)。

由表 3 可知,玉米生育期内土壤水分大致处于盈余状态,年平均亏损量为 -33.7 mm,只有在枯水年有少量亏损。而无论枯水年还是丰水年,小麦生育期内水分亏损量都比较大,

证所用实测数据,2009 年年降水量为 609.5 mm,但年产量仅为 11 163.9 kg/hm²,这主要是因为夏季“9.20 暴雨”使得玉米产量大幅减产。而且虽然降水量大小对农业生产有一定程度的影响,但由于灌溉量大,所以产量水平差异不大。

为了解河北山前平原水分亏缺严重的详细情况,首先必须要根据该地区种植制度来进行具体分析。图 6 模拟结果表明,小麦年平均产量为 6 613.8 kg/hm²,玉米年平均产量为 6 831.1 kg/hm²,玉米年平均产量高于小麦年平均产量,但小麦年平均蒸散量为 402.7 mm,多于玉米年平均蒸散量 321.0 mm。小麦生育期内平均水分入渗量为 39.5 mm,玉米生育期内平均水分入渗量为 132.7 mm,这主要是由于河北山

表 3 小麦玉米不同年型水分亏损量

作物	水分亏损量(mm)			
	枯水年	平水年	丰水年	平均
小麦	301.6	264.4	180.8	266.3
玉米	84.1	-50.3	-209.5	-33.7

年平均亏损量为 266.3 mm,生育期内降水根本无法满足作物生长需求。小麦耗水量极大,生育期内必须要大量灌溉才能满足其生长需求,这不利于该地区水资源的可持续利用。因

此,调整冬小麦—夏玉米一年两熟制这一耗水严重的种植制度对于河北山前平原地区就显得十分重要。

3 结论

APSIM 模型可以较好地模拟河北山前平原冬小麦和夏玉米的产量、蒸散量 ET 以及土壤水储量的动态变化,适用于研究分析河北山前平原水资源消耗和产量水平的综合效应。本研究利用 APSIM 模型模拟不同年型下的小麦和玉米生产耗水状况,模拟结果表明,在河北山前平原地区,冬小麦生育期内的降水量远远低于冬小麦的耗水量,冬小麦—夏玉米一年两熟制这一耗水严重的种植制度不利于河北山前平原水资源的持续利用,河北山前平原地区种植制度的调整势在必行。

此外,APSIM 模型无法考虑病虫害的影响,同时由于一些人为因素和自然灾害的缘故,实测数据资料出现了偏差,这些均在一定程度上降低了 APSIM 模型的模拟精度。但从总体上看,这对 APSIM 模型的整体模拟效果影响不大,APSIM 模型在河北山前平原产量水平、水资源消耗的模拟研究上仍然有较好的适应性。

参考文献:

- [1] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 莫兴国, 薛玲, 林忠辉. 华北平原 1981—2001 年作物蒸散量的时空分异特征 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 181—187.
- [3] 陈博, 欧阳竹, 程维新, 等. 近 50a 华北平原冬小麦—夏玉米耗水规律研究 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1186—1199.
- [4] 张之淦, 张洪平, 孙继朝, 等. 河北山前平原第四系地下年龄, 水流系统及咸水成因初探——石家庄至渤海湾同位素水文地质剖面研究 [J]. 水文地质工程地质, 1987(4): 5—10.
- [5] 吴喜芳. 华北平原主要粮食作物蒸散量和水足迹估算研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2015.
- [6] 潘学鹏. 华北平原主要作物遥感提取及时空变化研究 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2015.
- [7] Asseng S, Keating B A, Fillery I R, et al. Performance of the APSIM—wheat model in Western Australia [J]. Field Crops Research, 1998, 57(2): 163—179.
- [8] Asseng S, Hvan K, Stol W. Performance and application of the APSIM N—wheat model in the Netherlands [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(1): 37—54.
- [9] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267—288.
- [10] Acuña T B, Lisson S, Johnson P, et al. Yield and water—use efficiency of wheat in a high—rainfall environment [J]. Crop and Pasture Science, 2017, 66(5): 419—429.
- [11] Peake A S, Huth N I, Kelly A M, et al. Variation in water extraction with maize plant density and its impact on model application [J]. Field Crops Research, 2013, 146(146): 31—37.
- [12] Gaydon D S, Meinke H, Rodriguez D. The best farm—level irrigation strategy changes seasonally with fluctuating water

- availability [J]. Agricultural Water Management, 2012, 103(1): 33—42.
- [13] Chauhan Y S. Potential productivity and water requirements of maize—peanut rotations in Australian semi—arid tropical environments—a crop simulation study [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 457—464.
- [14] 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1914—1925.
- [15] 肖登攀, 陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1539—1545.
- [16] 王国成, 许晶晶, 李婷婷, 等. 1980—2010 年华北平原农田土壤有机碳的时空变化 [J]. 气候与环境研究, 2015, 20(5): 491—499.
- [17] Sun H Y, Zhang X Y, Wang E L, et al. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production—A case study in the North China Plain [J]. European Journal of Agronomy, 2015, 70(1): 48—56.
- [18] Oort P A J, Wang G, Vos J, et al. Towards groundwater neutral cropping systems in the Alluvial Fans of the North China plain [J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 131—140.
- [19] Sun H, Zhang X, Wang E, et al. Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain [J]. Field Crops Research, 2016, 194: 94—102.
- [20] Xiao D, Tao F. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981—2009 [J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(7): 1111—1122.
- [21] Xiao D P, Qi Y Q, Shen Y J, et al. Impact of warming climate and cultivar change on maize phenology in the last three decades in North China Plain [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3/4): 653—661.
- [22] Wang J, Wang E, Yin H, et al. Declining yield potential and shrinking yield gaps of maize in the North China Plain [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 195(2): 89—101.
- [23] Li K, Yang X, Tian H, et al. Effects of changing climate and cultivar on the phenology and yield of winter wheat in the North China Plain [J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(1): 21—32.
- [24] Zhang Y, Feng L P, Wang E L, et al. Evaluation of the APSIM—Wheat model in terms of different cultivars, management regimes and environmental conditions [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2012, 92(5): 937—949.
- [25] 陈楠, 程萌. 菏泽市降水变化趋势与时空分布特征 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(36): 136—141.
- [26] 张玉娜, 徐长春, 李卫红, 等. 开都河流域气候变化特征及其对径流的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1): 81—89.
- [27] 贺俊杰. 锡林浩特市 50 年降水量变化特征分析 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(29): 271—278.
- [28] 王长林, 张林. 干旱对内蒙古农牧业生产的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 1983(1): 44—53.