

变化环境下农田水生产力定量表征研究进展与展望

王惟舒, 汪超子, 王兴旺, 霍再林*

(中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 【目的】农田水生产力是描述农业用水与农业产出的综合指标, 其定量表征是农业水资源及农业生产规划与管理的重要基础, 在气候变化及农业节水等农田管理模式改变等变化环境下农田水生产力定量表征成为国内外研究的热点。【方法】在解析农田水生产力形成过程的基础上, 从作物气孔-蒸腾-光合耦合过程、农田水循环及量化表征、农田水生产力过程量化及对变化环境响应等方面对目前相关研究进行了综述。【结论】未来应突破作物蒸腾-土壤水-地下水耦合机制、基于作物生长与水循环耦合过程的农田水生产力模型、农田水生产力对气候变化及农业节水的响应模拟3方面的研究。对变化环境下农田水生产力定量表征的未来研究进行了展望。

关键词: 变化环境; 农田水生产力; 定量表征; 农田水循环

中图分类号: S-1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020640

OSID:



王惟舒, 汪超子, 王兴旺, 等. 变化环境下农田水生产力定量表征研究进展与展望[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 76-80, 99.

WANG Weishu, WANG Chaozi, WANG Xingwang, et al. Water Productivity of Farmland in Response to Changing Environment: A Review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 76-80, 99.

0 引言

农田水生产力是指农田耗水对农业产出的贡献, 农田水生产力的提升是保障水安全和粮食安全的核心任务^[1]。与此同时, 全球气候变化加剧(温度升高、CO₂摩尔分数增加)已成为不争的事实^[2], 将对全球粮食安全产生影响^[3-4]。在此背景下, 迫切要求明晰气候变化及农业节水对农田水生产力的影响, 以期实现变化环境下农田水生产力的有效提升^[5-6]。叶片的气孔状态影响着作物的光合速率, 进而决定了作物生长、干物质的累积以及产量形成^[7]。作物蒸发蒸腾、根区土壤水分、地下水组成了农田水循环过程。作物生长过程以及农田水循环过程之间存在着耦合关系, 形成了农田水生产力^[8]。气候变化及农业节水对农田水生产力的影响过程复杂(图1)。一方面, 气候变化改变了作物生长的气象条件及物候, 将影响叶片气孔状态、作物生长过程及耗水过程^[9]; 另一方面, 农业节水直接改变了作物根区土壤水分及地下水补给条件, 将会引起农田水循环过程改变, 进而驱动作物生长变化^[6]。与此同时, 作物生长与农田水循环过程呈现出极强的耦合作用^[5]。因此, 在认识作物生长过

程与农田水循环耦合过程的基础上, 量化表征气候变化及农业节水等变化环境下农田水生产力的响应是实现农业高效用水的基础。

1 国内外研究现状

农田水生产力的形成是涉及作物生理生态学、灌溉学、水文学及土壤环境学等多学科的科学问题。长期以来, 国内外学者从不同角度对农田水生产力相关问题进行了深入研究, 研究方法从传统的作物生长及水土环境农田尺度试验研究向农田水生产力所涉及关键过程的量化模拟发展; 研究内容从根区水土环境对作物生长影响深入到了作物蒸腾及光合过程的耦合。总体来说, 在作物气孔-蒸腾-光合耦合过程、农田水循环过程及量化表征、农田水生产力量化及变化规律等方面取得了长足的发展。

1.1 作物气孔-蒸腾-光合耦合过程

气孔是植物叶片水汽扩散和CO₂吸收的共同通道, 气孔开度的确定是定量描述作物蒸腾与光合过程的基础。气孔主要受气象因子(温度、湿度、光照、CO₂摩尔分数等)及土壤水分等因素复杂影响。目前植物叶片气孔量化方法包括基于ABA控制理论模型、基于环境因子控制的模型、基于光合作用的反演模型等^[10]。然而, 限于模型的适用性, 基于气孔与影响因子统计关系基础上所获得的乘合模型是目前最为常用的气孔模型^[11]。由于乘合模型无法表示多时间尺度气孔对影响因子的响应规律, Yu等^[12]发展了叶片气

收稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0400107)

作者简介: 王惟舒(1995-), 女, 博士研究生, 主要从事农田生态系统水热碳通量以及水分利用效率研究。E-mail: wws0208@cau.edu.cn

通信作者: 霍再林(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源及农业高效用水方面的研究。E-mail: huozl@cau.edu.cn

孔的组合模型。值得指出的是，目前多数气孔模型通过叶水势来表征气孔对水分的响应。随着研究的深入，叶片气孔与水分的更多内在作用机制被逐渐认识，普遍认为土壤水分比叶水势更能反映气孔导度对水分的响应^[13-14]。然而，由于气孔受环境多因子协同作用效应的存在，且不同类型的作物对水分环境的响应规律存在差异^[15-16]，叶片气孔对土壤水分的响应定量关系尚未取得突破进展。而关于土壤盐分以及施肥所带来的微量元素变化对叶片气孔的影响，目前多是通过控制性试验来探求土壤中的盐分以及土壤肥力对作物光合特性、产量以及水分生产力的影响方面的定性分析^[17]。且土壤水肥盐具有耦合协同作用^[18]，气孔导度对于土壤生境因素的响应规律仍缺少具体的定量关系模型描述。在气孔模型的基础上，叶片尺度气孔-光合-蒸腾的耦合量化表征得到了发展。Farquhar 等^[19]提出了叶片光合作用生化模型，该模型将光合速率表示为 CO_2 摩尔分数、光量子通量密度和温度的函数，为定量描述光合作用提供了可能。Leuning 等^[20]进一步提出了将光合作用、水汽、 CO_2 传输、热量平衡等进行耦合的思路，并建立了相关模型。由于农田及区域尺度水碳耦合模拟的需要，冠层尺度光合-蒸腾耦合模拟是近年来发展的重点，该类模型一般基于能量平衡和水量平衡原理，将叶片尺度光合作用模型直接扩展到冠层尺度来实现，包括大叶模型 (P-M)、二叶模型 (Shuttleworth-Wallace) 和多叶模型^[21]。从光

合与蒸腾耦合过程机理出发，研究者试图考虑边界层导度的影响，建立由叶片光合作用、蒸腾作用、气孔导度等子模型组成的完整生理模型^[22]。尽管该类模型促进了人们对光合与蒸腾耦合机理的理解，但由于模型结构复杂，还尚未被广泛应用。Yu 等^[12]开发了基于气孔行为的光合蒸腾耦合模型 (SMPTSB)，有效提高了植物水碳耦合模型的实用性。在光合蒸腾模拟应用方面，目前存在最大的困难是叶片尺度向农田尺度提升的问题。目前普遍的研究思路是引入冠层导度的概念，直接采用大叶模型或二叶模型进行冠层尺度光合与蒸腾的模拟，其中最为关键的是冠层导度与水分关系的表达。受叶片气孔模型的启发，叶水势被用于表征冠层导度对水分的响应^[9]。近年来，大量研究认为水分对冠层导度的影响具有很大的不确定性^[23-24]。处在不同生育阶段的不同种类植物，在不同的气象条件和土壤条件下，冠层导度对水分环境的响应规律存在差异，这也是限制冠层光合与蒸腾耦合模拟精度的重要因素^[25-26]。在陆面模型中，土壤水分对冠层气孔的影响逐渐被引入，极大促进了模型的发展及实际应用^[27]。然而，对于中尺度 (农田) 而言，冠层光合与蒸腾在作物叶片层间差异较大，采用大叶模型或二叶模型方法必然无法有效表达冠层光合与蒸腾的时空差异。此外，在农业生态系统中，土壤水分的时空变异较大，作为光合与蒸腾的耦合关键环节，作物气孔对土壤水分响应缺乏更为深入的研究。

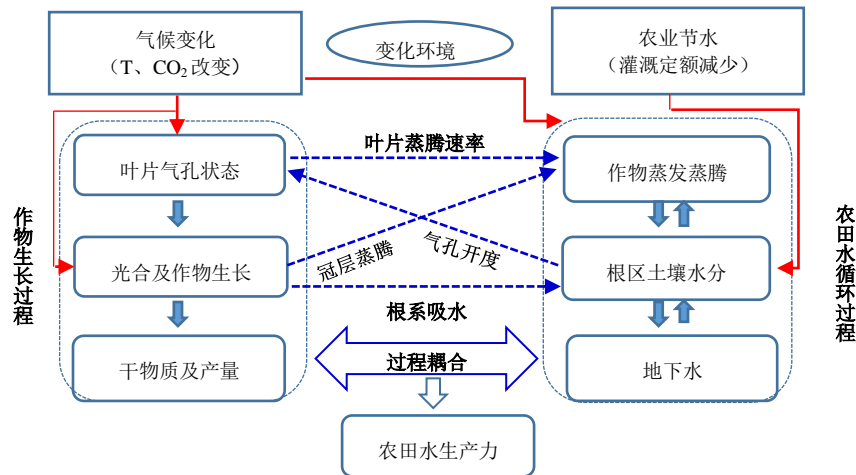


图1 变化环境下作物生长与农田水循环过程耦合关系

Fig.1 Coupling relationship between crop growth and farmland water cycle process under changing environment

1.2 农田水循环过程及量化表征

农田水循环是农田水生产力的关键驱动过程，特别是气-叶、根-土、土壤水-地下水界面水分通量的研究一直是相关领域的研究热点，分别形成了以水汽扩散理论与能量平衡为基础的耗水计算方法，建立了逆境胁迫条件下作物根系吸水模型以及基于土壤水动力学理论的土壤水地下水转化量化方法。与自然植被相比，由于农作物生长的时变性及灌溉引起的土壤水分入渗蒸发频繁变化，农田水循环具有其自身的特殊

性^[26]。受作物生理特性的影响，气候变化对农田耗水的响应受到了高度关注。一般认为温度升高导致耗水的增加^[29]；而 CO_2 摩尔分数升高一方面会抑制气孔开度、减少耗水，另一方面促进作物生长、增加耗水。因此，气候变化最终对农田耗水有何影响尚无定论。与此同时，大范围的农业节水也对农田耗水产生了明显影响^[30]。根系吸水过程是农田水循环关键环节，现有作物根系吸水模型较少考虑根系的生长过程^[31-32]。浅层地下水是旱区土壤水分维持的重要源，然而受

农田灌溉的影响, 地下水位在作物生育期波动明显, 对作物耗水的贡献具有时变性^[33-34]。在农业节水条件下, 地下水位下降导致土壤水与地下水转化发生改变, 目前对其的认识仅限于农业节水或地下水位单一因素对水转化的影响, 尚未深入揭示这二者之间的关联作用。

在确定界面水分通量的基础上, 地下水-土壤-植物-大气连续体 (GSPAC) 系统水分运动模型为深入理解农田水循环过程起到了重要作用。农田水循环模型包括数值模拟模型和水量平衡模型。基于经典 Richards 方程的数值模型已成为研究农田水文循环规律的重要手段, 如 HYDRUS^[35]、SWAP^[36], 但模型应用中所需土壤水分运动参数较多, 其应用受到一定程度限制^[37]。与此不同的是, 以水量平衡为基础的农田水循环概念性模型由于其结构相对简单且参数较少得到了广泛应用。一般来说, 农田水循环概念性模型采用 FAO 作物系数法计算农田蒸发蒸腾量, 采用水量平衡方法来模拟土壤水动态^[38-39]。考虑到根区土壤水分受蒸发蒸腾影响明显, 根系吸水模型被引入到土壤水量平衡模拟中^[40]。此外, 采用简化的达西公式来计算层间土壤水分运动是农田水循环概念性模型的另一发展方向^[41]。需要指出的是, 农田水循环受作物生理生态过程的影响, 多数农田水循环模型对蒸腾量计算环节缺乏考虑叶片气孔的影响, 而且土壤水分运动模拟中对作物根系生长过程的考虑也不足。

1.3 农田水生产力过程量化及对变化环境响应

农田水生产力的形成涉及作物生长过程及水循环过程。在农业水管理中, 一般基于大量田间试验获得水分生产函数来表征作物产量与耗水之间的关系, 未考虑水分供给对作物产量形成过程的影响。因此, 作物生长模型成为农田水生产力量化的重要工具。目前国际主流的作物生长模型包括作物生长过程生理生化模型 (荷兰) 和作物生长过程干物质及产量形成过程模型 (美国)。前者已由主要描述冠层光合的第一个作物生长动力学模型 ELCROS 发展到了包括作物生产潜力、水分胁迫、土壤水分及营养元素的作物生理生态过程模型 WOFOST^[42-43]。尽管该类模型对揭示作物生长过程及对环境因素响应机制起到了重要作用, 但由于作物生长参数较多, 模型在农田应用受到限制。与此不同的是, 后者尽管大大简化了作物生理生化过程, 但侧重对作物干物质累积及产量的模拟, 在农业生产实践中得到了广泛应用, 如 DSSAT 模型^[44]及 EPIC 模型^[45]。由于其较强的适用性, 该类模型已运用到了区域尺度农业生产管理^[46]。

由于农业水管理的需要, 作物模型与水文模型的耦合已成为农田水生产力评估的必然趋势, 如 SWAP 模型将 WOFOST 作物模型与土壤水动力学过程耦合^[36], RZWQM 模型将 DSSAT 作物模型与土壤水动力学过程耦合^[47], Aquacrop 模型将简单作物生

长模型与土壤水概念性模型耦合^[48]。然而, 目前对作物生长与水循环过程的耦合主要是根系吸水与根区土壤水分动态的耦合, 对作物光合与蒸腾过程的耦合考虑不足。

农田水生产力受灌溉、气象、作物等影响, 随着对全球气候变化认识的深入, 气候变化及农业节水对农田水生产力的影响成为国内外研究的热点^[49]。该类研究主要包括基于人工控制气候 (温度及 CO₂ 摩尔分数) 研究作物叶片及植株尺度水分利用效率的响应^[50]及采用作物生长与水循环耦合模型模拟研究气候变化对农田尺度水生产力的影响^[51]。由于不同类型作物光合及耗水过程的差异, 现有对农田水生产力对气候变化的响应的认识缺乏普适性^[52]。从研究的方法角度讲, 人工气候室试验仅侧重揭示作物本身生理生态对气候变化响应的机制, 而农田尺度模型模拟主要侧重对农田水生产力的宏观规律的认识, 二者未进行有效的耦合。此外, 目前的研究尚欠缺农田水循环对水生产力的驱动过程认识。

2 存在的问题

综上所述, 尽管国内外对农田水生产力形成所涉及的作物光合蒸腾及作物生长过程、农田水循环过程实现了量化表征, 但由于作物蒸腾与光合基于叶片气孔耦合的特点, 且气孔受气象及土壤环境等影响, 目前还无法满足评价农田水生产力对气候变化及农业节水响应的需要, 存在以下亟待解决的科学问题: ①气孔对根区水分响应关系及基于气孔的植株光合与蒸腾耦合关系; ②土壤中盐分以及氮、磷微量元素等其他胁迫因子与土壤水分对气孔的耦合影响关系的定量表征; ③基于气孔响应的作物生长过程与农田水循环过程的耦合定量表征。未来应采用控制实验与数学模拟的方法, 深入研究作物生长及农田水循环的耦合过程, 实现农田水生产力的量化表征, 明确研究区农田水生产力对变化环境的响应。

3 研究展望

未来应以全球气候变化和规模化农业节水为背景, 以作物生长及农田水循环对变化环境响应过程为主线, 在明晰作物气孔对土壤水分响应及频繁灌溉入渗-蒸发条件下土壤水与地下水转化机理的基础上, 进一步揭示作物光合及生长过程与农田水循环耦合机制及量化方法; 突破基于气孔的叶片蒸腾与光合时空尺度提升技术, 发展基于作物生长-水循环耦合的农田水生产力模型, 阐明农田水循环对农业生产力的驱动过程; 识别农田水生产力影响的关键因素, 研究农田水生产力对气候变化及农业节水的响应机制。

3.1 作物蒸腾-土壤水-地下水耦合机制

研究作物叶片气孔及蒸腾、光合过程对环境因子的响应规律及定量表征方法, 重点研究气孔、蒸

腾、光合与根区土壤水分的关系及其响应的滞后效应; 研究频繁入渗-蒸发条件下土壤水与地下水转化关系, 重点揭示旱区作物生长条件下地下水对耗水的贡献作用; 在突破作物叶片蒸腾-土壤水-地下水时间尺度匹配的基础上, 研究三者的耦合机制, 量化其耦合关系。

3.2 基于作物生长与水循环耦合过程的农田水生产力模型

研究叶片气孔、蒸腾、光合在冠层叶片层间分布规律及时空尺度提升方法, 获得冠层尺度基于气孔的蒸腾与光合过程定量表达; 研究基于气孔的作物蒸腾-土壤水-地下水过程耦合的农田水循环概念模型; 建立基于气孔的作物生长过程模型, 发展作物生长与水循环过程耦合的农田水生产力模型, 研究模型参数的敏感性及其适用性。

3.3 农田水生产力对气候变化及农业节水的响应模拟

基于所发展的农田水生产力过程模型模拟气候变化(温度升高、CO₂ 摩尔分数升高)及农业节水(灌溉定额减少)条件下作物生长、农田水循环及农田水生产力响应过程, 研究气候变化和农业节水对农田水生产力的协同影响; 通过重建研究区历史气候变化及农业用水条件下农田水生产力变化过程, 识别农田水生产力变化的主要驱动因素, 预测未来变化环境下农田水循环改变过程及对农田水生产力的驱动作用。

参考文献:

- DALIN C, QIU H, HANASAKI N, et al. Balancing water resource conservation and food security in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(15): 4 588-4 593.
- IPCC. Climate change 2014: mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- WHEELER T, VON BRAUN J. Climate change impacts on global food security[J]. Science, 2013, 341(6145): 508-513.
- SAKSCHIEWSKI B, VON BLOH W, HUBER V, et al. Feeding 10 billion people under climate change: How large is the production gap of current agricultural systems?[J]. Ecological Modelling, 2014, 288: 103-111.
- BOUMAN B A M. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales[J]. Agricultural Systems, 2007, 93(1/2/3): 43-60.
- MORISON J I, BAKER N R, MULLINEAUX P M, et al. Improving water use in crop production[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2008, 363(1491): 639-658.
- COLLATZ G J, BALL J T, GRIVET C, et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 54(2/3/4): 107-136.
- ZHAO H L, ZHOU R L, ZHANG T H, et al. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy cropland of Inner Mongolia, North China[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(2): 175-185.
- PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- DAMOUR G, SIMONNEAU T, COCHARD H, et al. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level[J]. Plant, Cell & Environment, 2010, 33(9): 1 419-1 438.
- JARVIS P. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1976, 273(927): 593-610.
- YU G R, KOBAYASHI T, ZHUANG J, et al. A coupled model of photosynthesis-transpiration based on the stomatal behavior for maize (*Zea mays* L.) grown in the field[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 401-415.
- EGEA G, VERHOEF A, VIDALE P L. Towards an improved and more flexible representation of water stress in coupled photosynthesis-stomatal conductance models[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(10): 1 370-1 384.
- 袁国富, 庄伟, 罗毅. 冬小麦叶片气孔导度模型水分响应函数的参数化[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 463-470.
- YUAN Guofu, ZHUANG Wei, LUO Yi. Parameterization of water response functions in leaf stomatal conductance model for winter wheat[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(5): 463-470.
- ALDER N N, SPERRY J S, POCKMAN W T. Root and stem xylem embolism, stomatal conductance, and leaf turgor in *Acer grandidentatum* populations along a soil moisture gradient[J]. Oecologia, 1996, 105(3): 293-301.
- 张光灿, 刘霞, 贺康宁, 等. 金矮生苹果叶片气体交换参数对土壤水分的响应[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 66-72.
- ZHANG Guangcan, LIU Xia, HE Kangning, et al. Responses of gas exchange parameters of goldspur apple tree to soil water variation[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 66-72.
- DELFINO S, ALVINO A, ZACCHINI M, et al. Consequences of salt stress on conductance to CO₂ diffusion, Rubisco characteristics and anatomy of spinach leaves[J]. Functional Plant Biology, 1998, 25(3): 395.
- MARICLE B R, KOTEYEVA N K, VOZNESENSKAYA E V, et al. Diversity in leaf anatomy, and stomatal distribution and conductance, between salt marsh and freshwater species in the C₄ genus *Spartina* (Poaceae)[J]. New Phytologist, 2009, 184(1): 216-233.
- FARQUHAR G, VON CAEMMERER S. Modelling of Photosynthetic Response to Environmental Conditions [M]. Berlin: Springer, 1982.
- LEUNING R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C₃ plants[J]. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(4): 339-355.
- SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- 于强, 王天铎. 光合作用-蒸腾作用-气孔导度的耦合模型及 C₃ 植物叶片对环境因子的生理响应[J]. 植物学报, 1998, 40(8): 740-754.
- YU Qiang, WANG Tianduo. Simulation of the physiological responses of C₃ plant leaves to environmental factors by a model which combines stomatal conductance, photosynthesis and transpiration[J]. Acta Botanica Sinica, 1998, 40(8): 740-754.

- [23] GAN G J, KANG T T, YANG S, et al. An optimized two source energy balance model based on complementary concept and canopy conductance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 223: 243-256.
- [24] 李峥, 牛丽华, 袁凤辉, 等. 辽西农林复合系统中杨树冠层导度特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 2 975-2 982.
- LI Zheng, NIU Lihua, YUAN Fenghui, et al. Canopy conductance characteristics of poplar in agroforestry system in west Liaoning Province of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 2 975-2 982.
- [25] COMBE M, DE ARELLANO J V G, OUWERSLOOT H G, et al. Plant water-stress parameterization determines the strength of land-atmosphere coupling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 217: 61-73.
- [26] HARRIS P P, HUNTINGFORD C, COX P M, et al. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122(3/4): 215-227.
- [27] FLEISHER D H, DATHE A, TIMLIN D J, et al. Improving potato drought simulations: Assessing water stress factors using a coupled model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 144-155.
- [28] BROOKS P D, CHOROVER J, FAN Y, et al. Hydrological partitioning in the critical zone: Recent advances and opportunities for developing transferable understanding of water cycle dynamics[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 6 973-6 987.
- [29] NAM W H, HONG E M, CHOI J Y. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 150: 129-138.
- [30] JAKSA W T, SRIDHAR V. Effect of irrigation in simulating long-term evapotranspiration climatology in a human-dominated river basin system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 109-118.
- [31] PETERS A. Modified conceptual model for compensated root water uptake - A simulation study[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 1-10.
- [32] VOGEL T, VOTRUBOVA J, DUSEK J, et al. Mesoscopic aspects of root water uptake modeling - Hydraulic resistances and root geometry interpretations in plant transpiration analysis[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 88: 86-96.
- [33] WANG X W, HUO Z L, FENG S Y, et al. Estimating groundwater evapotranspiration from irrigated cropland incorporating root zone soil texture and moisture dynamics[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 501-509.
- [34] WANG X W, HUO Z L, GUAN H D, et al. Drip irrigation enhances shallow groundwater contribution to crop water consumption in an arid area[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(6): 747-758.
- [35] ŠIMŮNEK J, NIMMO J R. Estimating soil hydraulic parameters from transient flow experiments in a centrifuge using parameter optimization technique[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(4): W04015.
- [36] VAN DAM J C, GROENENDIJK P, HENDRIKS R F, et al. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 640-653.
- [37] CAMPOS I, GONZÁLEZ-PIQUERAS J, CARRARA A, et al. Estimation of total available water in the soil layer by integrating actual evapotranspiration data in a remote sensing-driven soil water balance[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 427-439.
- [38] SCHOUPS G, HOPMANS J W, YOUNG C A, et al. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin valley, California[J]. *PNAS*, 2005, 102(43): 15 352-15 356.
- [39] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [40] KENDY E, GÉRARD-MARCHANT P, TODD WALTER M, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2 011-2 031.
- [41] BANIMAHDI S A, KHALILI D, KAMGAR-HAGHIGHI A A, et al. Evaluation of groundwater potential recharge models considering estimated bare soil evaporation, in a semi-arid foothill region[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(1): 162-172.
- [42] VAN DIEPEN C A, WOLF J, VAN KEULEN H, et al. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use and Management*, 1989, 5(1): 16-24.
- [43] DE WIT A, BOOGAARD H, DE FUMAGALLI D, et al. 25 years of the WOFOST cropping systems model[J]. *Agricultural Systems*, 2019, 168: 154-167.
- [44] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [45] WILLIAMS J R, JONES C A, KIRBY J R, et al. The EPIC crop growth model [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 489-511
- [46] ROSENZWEIG C, ELLIOTT J, DERYNG D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3 268-3 273.
- [47] HANSON J, AHUJA L, SHAFFER M, et al. RZWQM: Simulating the effects of management on water quality and crop production[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 57(2): 161-195.
- [48] VANUYTRECHT E, RAES D, STEDUTO P, et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 62: 351-360.
- [49] BAGLEY J, ROSENTHAL D M, RUIZ-VERA U M, et al. The influence of photosynthetic acclimation to rising CO₂ and warmer temperatures on leaf and canopy photosynthesis models[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(2): 194-206.
- [50] MEDLYN B E, ZAEHLE S, DE KAUWE M G, et al. Using ecosystem experiments to improve vegetation models[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 528-534.
- [51] EL CHAMI D, DACCACHE A. Assessing sustainability of winter wheat production under climate change scenarios in a humid climate—An integrated modelling framework[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 140: 19-25.
- [52] ASBJORNSEN H, GOLDSMITH G R, ALVARADO-BARRIENTOS M S, et al. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(1/2): 3-22.