

DOI: 10.5846/stxb201305020896

朱秀芳, 赵安周, 李宜展, 曹森, 李慕义. 农田灌溉对气候的影响研究综述. 生态学报, 2014, 34(17): 4816-4828.

Zhu X F, Zhao A Z, Li Y Z, Cao S, Li M Y. Impact of Irrigation on Climate. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4816-4828.

# 农田灌溉对气候的影响研究综述

朱秀芳<sup>1,2,\*</sup>, 赵安周<sup>1,2</sup>, 李宜展<sup>1,2</sup>, 曹森<sup>1,2</sup>, 李慕义<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要:** 过去 200 年全球灌溉农田面积迅速扩张, 灌溉对气候的影响逐渐受到世界各国研究者的关注。回顾了有关灌溉对气候的影响研究, 归纳了前人的研究手段, 指出了目前研究中存在的问题和困难, 并提出了未来灌溉对气候的影响研究应该注重如下几个方面: 1) 同时利用观测数据分析方法和模型模拟研究方法进行灌溉对区域气候的影响, 并将两者的结果进行对比分析, 以求做到互相验证; 2) 对于缺乏地面观测数据或者地面数据受其他因素(比如: 城市化)影响大的区域, 建议利用遥感观测数据进行灌溉对地表参数的影响研究; 3) 注意对灌溉四大属性(灌溉位置、灌水量、灌溉方式和灌溉时间)的精确模拟, 可以考虑耦合气候模型和作物模型进行模拟研究, 并注意区分灌溉旱地和灌溉水田。4) 提倡利用多模式集合的方式研究灌溉对区域气候的影响, 以减少灌溉对气候影响(强度和方向)模拟结果的不确定性; 5) 未来也应该考虑模拟灌溉和气候变化间的互馈影响。

**关键词:** 农田灌溉; 气候变化; 区域尺度; 全球尺度

## Impact of Irrigation on Climate

ZHU Xiufang<sup>1,2,\*</sup>, ZHAO Anzhou<sup>1,2</sup>, LI Yizhan<sup>1,2</sup>, CAO Sen<sup>1,2</sup>, LI MUYI<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Irrigation is one of the most important land management techniques used to grow crops in dry areas and increase food production. The use of agricultural irrigation has grown rapidly over the past 200 years. In theory, an agricultural irrigation system can impact climate in several ways, both directly and indirectly. Excessive evapotranspiration (ET) resulting from irrigation in an agricultural system increases water vapor in the atmosphere. Water vapor is the most dominant greenhouse gas, and it amplifies the warming effect of increased atmospheric levels of carbon dioxide. This is regarded as a positive feedback in our climate system. Some reports have linked water vapor to changes in convection and precipitation patterns. ET also brings about changes in the land surface energy partition, and it cools the land surface and reduces the near-surface air temperature. Irrigation also increases soil moisture, which can modify the radiative properties of the soil (such as its albedo), control the partitioning of the heat flux, impact land surface processes, and influence the regional climate system. The tremendous increase in irrigated areas and the potential impact of irrigation on climate may have contributed to the formation of the current climate system, and it has the potential to influence our future climate system as well. Hence, it is important to explore the impact of irrigation on the near-surface climate. Such information can improve our understanding of how human activities affect climate. It can also be used to guide policies aimed at mitigating or adapting to climate change, and it can help build a precise model to project the future impact of irrigation on climate systems and

**基金项目:** 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学)人才培养项目(2013-RC-04); 高等学校博士学科点专项科研基金中国农业灌溉对区域气候影响的数值模拟研究项目(20130003120041); 北京师范大学自主科研基金农业灌溉对黄淮海区域气候的影响研究项目(2013YB74)

收稿日期: 2013-05-02; 网络出版日期: 2014-03-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

irrigation requirements under future scenarios. As a result, researchers from all over the world have been focusing more attention on the impacts of irrigation on climate. So far, there have been a number of reports on the impact of irrigation on near-surface air temperature, energy fluxes, groundwater, water vapor, and precipitation based on climate observations and modeling studies. This paper reviewed the published studies on the impact of irrigation on climate, summarized the methods used by previous researchers, identified the shortcomings of current studies and the challenges of studying the impact of irrigation on climate, and finally we made suggestions regarding the directions of future research. First, a comprehensive evaluation method needs to be developed in which evidence from both observational studies (remote sensing and meteorological measurement) and modeling studies can validate each other. Second, remote sensing observation is a promising tool since it can provide land parameter information on a large scale, including soil moisture, albedo, land surface temperature, vegetation cover, and so on. It could be a valid method to determine the impact of irrigation on the local surface climate, especially in those regions where direct observations are limited or obscured by other factors, such as urbanization. Third, to avoid overestimating or underestimating the impact of irrigation, the modeling study should reflect reality as much as possible, taking into account such factors as irrigation patterns (spray irrigation, flood irrigation, or drop irrigation), rate, location, and time. Combining a crop growth model with a climate model could be a promising solution. Fourth, simulating the impact of irrigation on climate by using multiple-model ensembles can eliminate the uncertainties in the simulation results obtained from a simulation that uses only one model. Fifth, the interaction between irrigation and climate needs to be explored in future research.

**Key Words:** agricultural irrigation; climate impact; regional scale; global scale

灌溉农业是指以水利灌溉设施为保障,满足作物对水分要求以获得稳产高产的农业或者是在天然降水极少的干旱、半干旱地区,依靠水利工程设施发展起来的农业。灌溉作为一种稳产增产和提高农村人民收入水平的手段,在过去的 200 年得到迅速扩张。据报道,全球的灌溉农田面积在 1800 年约为 8 百万  $\text{hm}^2$ ,1900 年约为 0.47 亿  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>,而 2000 年增长到 2.74 亿  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>。此外,全球灌溉农业耗水量占了人类总耗水量的 84%<sup>[1]</sup>。

理论上,农田灌溉直接或间接的都会对气候系统产生一定的影响(图 1)<sup>[3]</sup>。一方面,灌溉增加了农田的蒸散量,进而增加了大气中的水蒸气。水蒸气是一种重要的温室气体,其所产生的温室效应大约占整体温室效应的 60%—70%,水蒸汽增加会加强温室气体效应。而且,水蒸气增加后使得近地面水汽压增加、露点增加、温度露点差变小、水汽凝结高度下降,从而影响大气对流以及降雨格局。另一方面,灌溉农田蒸散量的增加(即潜热增加)也改变了地表能量的分割,使得更少的能量用于加热地面(即显热减少),降低了地表温度,进而降低了近地面的气温。再者,灌溉增加了土壤湿度,土壤湿度是地表重要的物理参数之一,可以影响地表辐射属性(例

如反照率)和土壤热容量,改变热通量的分割和水分的再分配,最终影响地表过程,使大气环流结构发生变化。

考虑到灌溉农业的迅猛发展以及农田灌溉对气候的潜在影响,农田灌溉的发展可能已经影响了气候系统并将持续影响将来的气候系统。因此,灌溉对气候的影响逐渐受到世界各国研究者的关注。本文回顾了过去有关灌溉对气候的影响研究,并根据前人的研究成果总结了灌溉对近地表参数和气候的具体影响,归纳了前人的研究手段,进一步探讨了灌溉在过去、未来气候变化中可能起到的作用,最后指出目前研究中存在的问题和困难,并提出了未来研究中应该考虑的重点。

## 1 农田灌溉对气候的影响

灌溉对气候的影响研究始于 20 个世纪 60 年代,随后逐渐受到世界各国研究者的关注<sup>[4]</sup>,涉及的内容主要包括农田灌溉对近地面温度<sup>[5-9]</sup>、能量流<sup>[10-11]</sup>、水蒸汽<sup>[3]</sup>、地表参数<sup>[12-13]</sup>和降水<sup>[14-18]</sup>的影响。总结来说,有关灌溉对气候影响的研究主要包括全球和区域两个尺度上的研究(特别说明:灌溉对农田小气候的影响研究不在本文综述的范围内)。

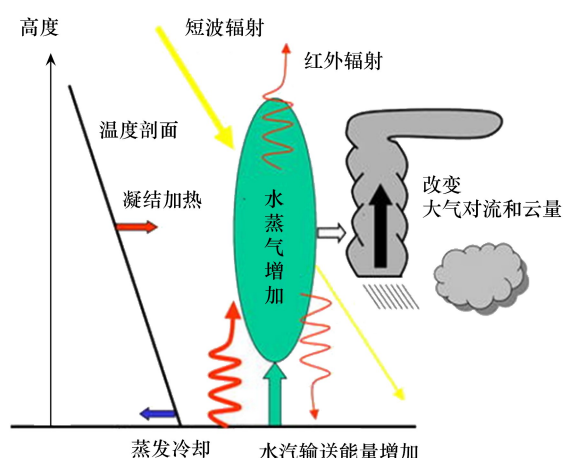


图1 灌溉对大气的物理属性和大气的运动过程的潜在影响<sup>[3]</sup>  
Fig.1 Schematic of the atmospheric properties and processes potentially induced by irrigation<sup>[3]</sup>

区域尺度的研究主要集中在灌溉农业发展迅速和灌溉强度大的国家和地区(比如美国和印度),研究目的在于提供灌溉对区域气候影响的实证,并结合模拟研究阐述灌溉对区域气候影响的物理机制。全球尺度的研究重点在于研究灌溉对气候在全球平均水平上的影响,对比分析灌溉在全球不同区域的影响强度差异,揭示灌溉对气候产生影响的主要因素,阐明灌溉对各地区影响上存在差异的原因。过去研究的基本结论为:农田灌溉对全球年平均温度的影响可以忽略不计<sup>[19]</sup>,但在局部区域上有明显的降温作用<sup>[20]</sup>,且降温作用在干旱的季节和干旱的地区更加显著。此外,农田灌溉每年向大气输送的水汽通量约为  $2600 \text{ km}^3$ <sup>[21]</sup>,使得区域大气水汽含量明显增加,促进了大气中水汽的重新分配,影响了降雨的形成<sup>[3,11,18]</sup>。

### 1.1 灌溉对区域气候的影响

#### 1.1.1 美国

Stidd<sup>[22]</sup> 1976 年最早报道了大面积灌溉使得哥伦比亚盆地降水增加。Changnon<sup>[23]</sup> 1973 年发现美国德克萨斯州西北灌区自 20 世纪 40 年代后期开始,雷暴天数增加了 25%,晴空天数减少了 19%。Beebe<sup>[24]</sup> 1974 年发现德州大草原灌区龙卷风发生最频繁的 6 月正是灌溉强度最大的时间,而周边非灌溉区龙卷风多发生在 5 月份,此外灌区龙卷风发生的次数在灌溉时节增加了 2—3 倍,由此 Beebe 指出灌溉增加了德州大草原区龙卷风发生的频率。此外,Beebe 还发现 1950—1975 年间灌区冰雹天气出

现的次数增加了两倍,而且灌区的露点温度比非灌溉区要高。Marotz 等<sup>[25]</sup> 1975 年发现美国堪萨斯州南部灌区灌溉的强度和积云量存在正相关关系。Burman 等<sup>[26-27]</sup> 1975 年和 1977 年在美国爱达荷州的研究发现灌溉可以降低日最高、最低和平均温度,增加水汽压和潜在蒸散,减小风速。Schickedanz<sup>[28]</sup> 1976 年和 Worthington<sup>[29]</sup> 1977 年发现灌溉使得美国大平原的降水增加。Barnston 和 Schickedanz<sup>[14]</sup> 1984 年指出低层辐合抬升是灌溉引起云量和降水增加的基础天气条件。静止锋对于灌溉引起的降水是非常有效的。灌溉可以使得干热季节的日最高气温下降  $2^\circ\text{C}$ ,湿冷季节的日最高气温下降  $1^\circ\text{C}$ 。Segal 等<sup>[18]</sup> 1998 年利用区域气候模型 PSU/NCAR MM5 模拟了灌溉对美国北部灌区降水的影响,指出灌溉对降水的影响主要表现在改变了已有的降水场,而不会产生新的降水场,而且灌溉对降水的影响受非局地气候效应的影响显著,并指出应该把灌溉对气候的影响从其他人类活动对气候的影响中区分出来。Moore 和 Rojstaczer<sup>[17]</sup> 2001 年在美国大平原利用 1950—1997 年的降水观测数据和灌溉统计数据分析了灌溉和降水之间的关系,并重点讨论了 3 个重灌区(内布拉斯加州,堪萨斯州和德克萨斯州)灌溉和降水的关系,指出 1950—1997 年间灌溉引起研究区降水变化的证据不足。Mahmood 等<sup>[8,30]</sup> 2004 年和 2006 年分别在美国内布拉斯加州对比分析了 5 个灌溉观测站和 5 个非灌溉观测站长期的月平均最高温度、平均温度和最低温度,指出灌溉使得该地区在 1945—1990 年间温度平均下降了  $1^\circ\text{C}$ 。Kueppers 等<sup>[6]</sup> 2007 年利用 RegCM3 模拟了灌溉对美国加利福尼亚州的影响,指出当自然植被转化为灌溉农田后,可以使得 8 月份的平均温度、最小温度和最高温度分别降低约  $3.7^\circ\text{C}$ ,  $0.9^\circ\text{C}$  和  $7.5^\circ\text{C}$ ,灌溉的制冷效应不仅限于被灌溉的区域。总体来说灌溉的降温作用在暖干的夏季最明显,在湿冷的冬季最不明显。Kanamaru 和 Kanamitsu<sup>[31]</sup> 2008 年利用斯克里普斯试验气候预测中心(ECPC)的区域光谱模型模拟了灌溉对加利福尼亚中央峡谷夏季夜间最低温度的影响,结果显示灌溉使得 7 月的  $^\circ\text{C}$  夜间最低温度增加了  $3.5^\circ\text{C}$ ,并指出夜间最低气温的升高主要是由于灌溉使得土壤热导率和地表热通量增加。Lobell 和 Bonfils<sup>[7]</sup> 2008 年指出灌溉使得 1934 到 2002 年间加

利福尼亚夏季(6—8月份)的平均最高温度下降了2℃,但是对于平均最低温度影响不显著。Ozdogan等<sup>[32]</sup>2010年利用陆面模式Noah模拟了灌溉对美国地表参数的影响,结果显示灌溉显著地改变了地表能量和水分收支平衡,在2003年作物生长季,灌区平均蒸散量增加了12%,而且在局部地区灌溉的影响更加显著,比如灌溉使得加利福尼亚、爱达荷东部、华盛顿南部、科罗拉多南部作物生长旺季时节的潜热通量增加超过了100 W/m<sup>2</sup>,地表热通量、净辐射、蒸散量、径流量,土壤湿度分别改变超过了3 W/m<sup>2</sup>、20 W/m<sup>2</sup>、5 mm/d、0.3 mm/d、100 mm。

### 1.1.2 印度

印度人口占了世界总人口的1/6,其农业生产主要依靠夏季季风降水<sup>[33]</sup>。灌溉对于印度经济发展和减少贫困具有举足轻重的作用<sup>[34]</sup>。1951到1997年间,印度灌溉农田的面积从2300万hm<sup>2</sup>增加到了9000万hm<sup>2</sup><sup>[33]</sup>。在灌溉对区域气候的影响问题上,印度是继美国之后被研究最多的地区。Lohar和Pal<sup>[16]</sup>1995年模拟了西孟加拉邦南部地区灌溉对季风前降雨的影响,指出灌溉并不一定会增加降水,对于中尺度环流影响更大的地区灌溉可能减少降水。例如西孟加拉邦南部地区中尺度环流影响更大,近海灌区土壤湿度的增加阻碍了海风环流的发展,减少了低空水汽,导致了内陆水分供应的缩减,而内陆水分供应是雷雨天气形成的重要条件。此外,低空海风锋的减弱也不利于雷暴等强对流天气的发生。de Rosnay等<sup>[35]</sup>2003年在陆面模型ORCHIDEE中加入灌溉参数化方案,模拟了1987—1988年灌溉农业对印度半岛地表通量的影响,结果显示灌溉使得整个半岛的年平均潜热增加了3.2 W/m<sup>2</sup>。Douglas等<sup>[11]</sup>2006年指出灌溉农业使得印度的年平均水汽通量和潜热通量分别增加340 km<sup>3</sup>和9 W/m<sup>2</sup>。Biggs等<sup>[36]</sup>2008年指出1960—1990年间克里希纳盆地的灌溉面积迅速扩张,1990年后逐步趋于稳定。1901—1960年间恒河奎师那河的年平均流量为226 mm,而1990—2005年间减少到64 mm,与此同时显热通量平均减少了约12.7 W/m<sup>2</sup>。此外,他们还发现在同一时间段内大气褐云使得该地区的显热通量平均减少了约11.2 W/m<sup>2</sup>,为此他们指出1960—2005年间灌溉对印度南部的克里希纳盆地显热通量的影响等同于甚至大于大气褐云对该地区显热通量的影

响。Lee等<sup>[15]</sup>2009年分析了印度次大陆1982—2003年间NDVI、灌溉、显热、潜热、表面温度和早期季风降雨之间的关系,指出印度次大陆早期夏季季风降雨减弱可部分归因于灌溉,因为灌溉降低了地表温度,减少了海陆间的热力对比,从而削弱了季风环流。Douglas等<sup>[33]</sup>2009年使用区域大气模拟系统(RAMS4.3)模拟了灌溉对印度季风气候的影响,结果显示当灌溉农田替代潜在植被后,显热平均减少了11.7 W/m<sup>2</sup>,其中旁遮普省和哈里亚纳邦的显热分别平均减少了77%(87.5 W/m<sup>2</sup>)和85%(65.3 W/m<sup>2</sup>),并指出灌溉增加了区域水汽通量,从而改变了对流有效位能,降低了表面温度,影响了区域循环模式和中尺度降水。毛慧琴等<sup>[37]</sup>2011年利用区域环境系统集成模式(RIEMS2.0)研究了灌溉对印度区域气候的影响,结果显示农田灌溉使得印度区域年平均气温降低了1.4℃,年平均降水率增加了0.35 mm/d。季风前期及6月份灌溉对区域气候的影响更加显著。

### 1.1.3 中国

中国大约有45%的农田是灌溉农田<sup>[38]</sup>。中国灌溉耕地面积从建国之初的1500万hm<sup>2</sup>开始迅速增加,到2008年已经达到了5850万hm<sup>2</sup>,并且中国的灌溉面积居世界之首。灌溉农业消耗的水资源占各部门消耗水资源量的首位。1949年农田灌溉消耗的水资源高达水资源消耗总量的97%,近些年来随着城市化进程和经济发展对水资源需求水平的大幅度提升,农业用水在国民经济各部门用水中所占比例有所下降,但仍然位居首位<sup>[39]</sup>。

目前甚少有关农田灌溉对中国区域气候影响的观测证据报道,导致这种情况的原因可能是:1)中国的气象观测站受城市化影响严重,有45%的气象观测站位于或者接近城市<sup>[40]</sup>;2)中国气候的形成与演变受大气环流(包括季风环流)及其季节变化的影响,干湿季明显,四季分明,雨热同期,降水时间和主要作物生长的时间重叠,掩盖了灌溉对气候影响。3)中国是世界上人口最多的国家,水资源和粮食安全一直是中国面临的严峻问题,为了节约用水,中国多采用补充灌溉方式,补充灌溉提供的水分是少量的,因此相对充分灌溉来说对于气候的影响会小些。4)黑碳气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分,对可见光和部分红外光谱有很强的吸收能力,对区域和

全球气候有着重要的影响。有报道指出中国黑碳气溶胶量是非常高的<sup>[41]</sup>,黑碳气溶胶能够导致正的辐射强迫,减弱气溶胶对地球的冷却效果,加速区域气候变暖。黑碳气溶胶导致的区域气候变暖也会掩盖灌溉的蒸发冷却效应。

尽管利用实测手段去研究灌溉对中国区域气候的影响困难重重,但仍有研究者进行了有益的尝试<sup>[9]</sup>。Zhu 等<sup>[12]</sup>2011 年利用遥感观测数据在中国的吉林省分析了灌溉对地表参数的影响,结果显示高灌溉区通常对应低的反照率和地表温度,高的土壤湿度,归一化植被指数和蒸散量。该研究证实了遥感观测是一种有效的研究灌溉对地表参数影响的手段,可以作为气候观测和模型模拟研究的补充方法。Zhu 等<sup>[9]</sup>2012 年同时利用气候观测数据和遥感观测数据研究了灌溉对吉林省近地面气温和地表温度的影响,指出灌溉对最高温度的影响大于对最低温度的影响,灌溉的影响强度和有效灌溉面积以及作物播种面积显著相关,此外灌溉的影响在干旱的年份越发突出。

除了实证研究外,也有研究者通过模型模拟的手段研究了灌溉对中国区域气候的影响。例如:李建云和王汉杰<sup>[42]</sup>2009 年用社会经济动力学模型预测了 2030 年中国北方 13 个省土地利用情况,并识别南水北调受水区作物生长季节农、林、牧业灌溉的面积分布,在此基础上利用 RegCM3 模拟研究了南水北调工程建成后,对中国北方 13 个省(区)范围内农田、农林混作区和草地等进行大面积灌溉所产生的区域气候效应。Zhao 等<sup>[43]</sup>2012 年应用 RegCM3 在新疆地区研究了灌溉对区域气候的影响,指出春季灌溉引发了土壤湿度的异常变化,导致了新疆春季和夏季降水的增加,同时灌溉使得新疆北部夏季气温明显降低,其中新疆的阿勒泰和塔城地区降温最多,下降强度可以达到 0.8℃。Wen 和 Jin<sup>[44]</sup>2012 年利用 SCAM 模拟研究了灌溉对中国西北地区的气候影响,指出灌溉可以降低温度、增加降水,灌溉对区域温度和降水的影响强度与灌溉强度成正比。

#### 1.1.4 其他地区

尽管灌溉对区域气候的影响研究主要集中在农田灌溉面积最大的三个国家(中国、印度和美国),但也有灌溉对其他区域气候的影响研究报道。例如 Alpert 和 Mandel<sup>[45]</sup>1986 年指出以色列中南部 1960

年代到 1980 年代表面风速和日气温下降与该地区农田灌溉的大面积扩张有关。de Ridder 和 Gallee<sup>[46]</sup>1998 年在以色列南部利用中尺度气候模型 MAR 模拟了灌溉对区域气候的影响,模拟结果显示当用灌溉地表替代半干旱的地表后,风速和温度的日变化减小了,同时他们指出灌溉对对流性降水的潜在影响并不是灌溉导致的大气水汽增加的直接效应,而主要体现为灌溉引起的热动力学变化的间接效应。Geerts<sup>[47]</sup>2002 年指出澳大利亚东南部的干旱地区大型灌区可以使得全年的月平均气温降低 1—2℃。Haddeland 等<sup>[48]</sup>2006 年指出 1979—1999 年间灌溉使得科罗拉多和湄公河流域年平均潜热分别增加了 1.2、1.3 W/m<sup>2</sup>,年平均表面温度降低了 0.04℃。

#### 1.2 灌溉对全球气候的影响

Yeh 等<sup>[49]</sup>1984 年在全球三个纬度带(30°N—60°N, 0—30°N 和 15°S—15°N)进行了灌溉影响的数值模拟实验,发现灌溉可以降低温度、增加降水,并指出降水的形成是由于灌区和非灌区下垫面性质不同导致了水平温度梯度的差异,激发了局地中尺度环流,进而引发了降水。Boucher 等<sup>[3]</sup>2004 年在全球尺度上进行了一系列的灌溉对气候影响的模拟实验,结果显示灌溉使得全球平均净辐射增加了 0.03—0.1 W/m<sup>2</sup>,局部降温可以高达 0.8℃。Gordon 等<sup>[21]</sup>2005 年指出 1961—1990 年期间森林退化使得全球水汽流减少了 3000 km<sup>3</sup>/a,而灌溉使得全球水汽流增加了 2600 km<sup>3</sup>/a,尽管全球水汽流的净变化几乎为 0,但是森林退化和灌溉空间位置的差异,使得水汽流的空间格局发生了变化。Lobell 等<sup>[20]</sup>2006 年指出现有的大气环流模型没有考虑灌溉对气候的影响机制,尽管灌溉在全球尺度上的平均影响很小,几乎可以忽略不计,但是对灌溉集中的农区影响显著,缺乏对灌溉的模拟可能是目前 GCM 在部分灌区模拟结果存在不确定性的主要原因之一。Bonfils 和 Lobell<sup>[5]</sup>2007 年研究显示灌溉对夏季平均日温度有显著的降温作用,但对夜间的温度影响不明显,并指出这主要是因为由灌溉所导致的潜热增加主要发生在白天。此外,他们还指出 20 世纪灌溉的迅速发展,对人类引起的温室效应有一定的抑制作用,然而随着灌溉面积的逐步稳定,由灌溉引起的降温效应可能会减弱,由此可能使得未来温室效应更加显著。Lobell 等<sup>[50]</sup>2009 年利用 CAM3.3 在

全球尺度上模拟了灌溉对气候的变化,并重点分析了全球 8 个主要的灌区(包括美国的加利福尼亚、内布拉斯加州、密西西比、西班牙、土耳其、咸海流域、印度恒河平原和中国东北地区),结果显示灌溉降温的强度在区域上有很大差异,这些差异可能由灌溉的范围、灌水量和云特征对灌溉响应的差异等因素造成的。Sacks 等<sup>[19]</sup> 2009 年利用 CAM3.0 耦合 CLM3.5 在全球尺度上模拟了灌溉对当代气候的影响,结果表明从全球平均水平上看,灌溉的影响可以忽略不计,但在局部地区影响显著:灌溉使得北部中纬地区、美国中部和东南部、中国西南部分地区、南亚和东南亚部分地区年平均温度降低了 0.5℃左右,但是加拿大北部部分地区温度升高 1℃左右,并指出灌溉(作为一种最重要的土地利用管理方式)对区域气候的影响和土地利用/覆盖对区域气候的影响在强度上是相当的,因此在研究人类活动对气候的影响时,不应忽略人类土地利用管理方式这一重要因素。Puma 和 Cook<sup>[51]</sup> 2010 年利用美国戈达德太空研究所的全球气候循环模型 ModelE 研究了 20 世纪灌溉农业发展对全球气候的影响,结果显示灌溉的影响在 20 世纪呈现逐渐增加的趋势,特别是在 1950 年以后影响更加显著。20 世纪早期灌溉主要集中在东南亚,并使该地区 6 月到 8 月间的温度显著下降,1950 年以后灌溉在北半球中纬度地区和热带地区的降温作用逐渐显著起来。他们还指出 Sack 等在模拟灌溉时<sup>[19]</sup>,将土壤含水量一直保持在饱和状态,这种方法使得模拟的灌水量比真实灌水量大了 100 倍左右。

## 2 农田灌溉对气候影响的研究方法

总结起来有关灌溉对气候影响的研究方法主要有两种:观测数据分析方法和模型模拟研究方法。基于观测值的研究主要是对比灌溉农田和附近雨养农田的气候(主要是温度)差异<sup>[18,52]</sup>,或者是对比雨养农田转换成灌溉农田前后气候(主要是温度)的差异<sup>[30,53]</sup>。气候观测数据本质上提供的是点状信息,由于地表覆盖状况、地形等的差异,点状信息并不能代表区域的平均状况。此外,由于灌溉农田站点背景信息(比如经纬度、高程、距离城市/海洋的远近程度、不同的下垫面、灌溉站点)的差异,研究者很难区分对比试验中站点间气候因子(比如气温)的差异是

由灌溉引起的还是由其他因素导致的。因此,目前已有灌溉农业对气候影响的研究大多采用的是模型模拟的方法。

模型模拟研究通常是比较不同模型(区域或全球,耦合或非耦合)模拟结果和控制实验(无灌溉)结果之间的差异。在模拟研究中,灌溉试验的完成主要依赖于研究者在上述模型中加入了对灌溉的刻画和模拟,因此模型模拟的结果很大程度上依赖于模型对灌溉四大属性的模拟能力:哪里灌(灌溉农田位置)、什么时候灌(灌溉时间)、怎么灌(灌溉方式)和灌多少(灌溉量)。

针对哪里灌的问题,目前世界各国的研究者已经做出了积极的努力。比如目前已有一些研究绘制了全球的灌溉区。其中之一是美国地质调查队利用 1992 年 4 月至 1993 年 9 月的 1km AVHRR 数据制作的全球土地覆盖图<sup>[54]</sup>。该图有 4 个灌溉类别:灌溉草地、稻田、热灌溉农田和冷灌溉农田。由于灌溉类别是该图整体分类体系的子集,因此灌溉类别的精度偏低。此外,全球粮食和农业组织粮农组织和法兰克福大学合作制作了全球的灌区图(FAO 灌区图)<sup>[2,55-56]</sup>。最新版本的 FAO 灌区图是 MIRCA2000,该图显示了 2000 年左右每个月的灌溉区和雨养区<sup>[57]</sup>,包含了 26 种作物类型(小麦、水稻、玉米、大麦、黑麦、小米、高粱、大豆、向日葵、土豆、木薯、甘蔗、甜菜、油棕、油菜籽、花生、干豆、柑橘、枣椰树、葡萄、可可豆和咖啡豆)和 402 个空间单元的农时历信息。该图的分辨率为 5 弧分×5 弧分。此外,国际水资源管理研究所(IWMI)也制作了一幅全球的灌区图<sup>[58-60]</sup>。该图的空间分辨率为 10km,由 10a 的 AVHRR NDVI,以及 SPOT-VEGETATION、JERS-1 和 Landsat GeoCover 2000 数据制作而成。灌区的面积统计信息包括两类:年灌溉面积和总的可灌溉面积。IWMI 灌区图提供了灌溉类别和灌溉强度信息,并且利用亚像元分解的方法得到了像元内灌溉面积的百分比值<sup>[61]</sup>。除了全球尺度的灌溉数据之外,也有些学者在其它尺度上绘制了灌区的分布<sup>[62-69]</sup>。以往研究中,多数研究者都利用 FAO 制作的全球灌溉农田的分布图去控制在哪儿灌溉,FAO 制作的全球灌溉图只在少数地区进行了验证,对于没有经过验证的区域(比如:中国),其灌溉农田的分布精度是有待考证的。

针对灌多少的问题,不同的研究者采用了不同的模拟方法,概括起来主要有如下几种:1)强制灌溉像元的土壤含水量保持在一个固定的高值上<sup>[20,31]</sup>或者在模型的灌溉区上强加一个固定的蒸散量<sup>[3,11,18]</sup>;2)根据土壤水平衡关系或者作物生长的潜在蒸散和有效降水之间的差异,估算灌溉需水量<sup>[35-36,48,51]</sup>;3)将实际调查统计的灌溉用水量进行空间化处理,控制灌溉像元在整个作物生长季的总灌水量,单位时间的灌溉量等于总灌水量除以作物生长季的长度<sup>[19]</sup>。三种方法中,显然第一种是最不合理的。第二种方法理论基础强,但是对于水资源缺乏的地区,实际灌溉用水量可能远远小于作物灌溉的需水量,而对于灌溉设施老化,灌溉用水利用率低的区域,实际灌溉用水量又可能大于作物灌溉的需水量。第三种方法的实际灌溉用水量可能最接近真实情况,但在进行空间化处理时会引入误差,此外整个生长季单位时间灌水量一致的假设也是不合理的。

对于什么时候灌的问题,大多研究都是将灌溉时间控制在作物生长季内<sup>[11,19,48]</sup>,有的研究者指定具体的灌溉时间段,比如一天 24h 内都在灌溉<sup>[19]</sup>,一天只灌溉 1h<sup>[19]</sup>,一天灌溉 4h(6:00—10:00)<sup>[32]</sup>。有的研究者采用了更加灵活的灌溉时间确定方案,比如在灌溉模拟过程中,当土壤含水量小于一个提前预设的阈值时<sup>[32,50]</sup>或者有效降水小于作物最优生长需水量时<sup>[36]</sup>就实施灌溉等。Lobell 等<sup>[50]</sup>指出灌溉时间可能对于灌溉影响的模拟结果有显著影响,而 Sacks 等<sup>[19]</sup>利用 offline 的 CLM 模拟了相同灌溉量和灌溉总时长(1h)下不同灌溉时间(0:00—1:00, 12:00—13:00)对气候影响上的差异,结果显示灌溉起止时间上的差异对模拟结果的影响不大(两次模拟结果的显热和地表温度的差异在 1%左右)。

对于灌溉方式的模拟,大多研究也并没有明确指出其模拟的灌溉方式,但总体来说主要包括喷灌和漫灌两种。喷灌是将水加在作物冠层的上方,类似降水,这种方式允许灌溉水有一部分被作物截流,在作物表面直接蒸发或者从作物茎叶落到地面上<sup>[32]</sup>。漫灌是直接将水加在地表,不考虑作物对灌溉水的截流<sup>[19,51]</sup>。有研究发现漫灌和喷灌对地表通量变化的影响差异显著<sup>[70]</sup>,但是该研究只是采用的 offline 的陆面模型进行的模拟,因此灌溉方式对气候的影响强度上是否存在显著差异的还有待进一步

探讨。

### 3 农田灌溉对气候变化的响应及互馈

灌溉可以对局地气候产生影响,与此同时气候变化也会通过影响水资源量的时空分配,改变作物耗水过程,影响作物需水量<sup>[71]</sup>,对农田灌溉产生反馈作用。国内外学者在农田灌溉对气候变化的响应及互馈方面也进行了大量的研究。

Rosenberg<sup>[72]</sup>、Cynthia<sup>[73]</sup>、Angel<sup>[74]</sup>等分别将未来气候模型(HadCM2、GCMs、天气发生器(LARS-WG))与水文模型(SWAT、WATBAL)、作物模型(CERES-Maize、SOYGRO、CROPWAT)以及规划模型(WEAP 水资源预测计划模型)耦合,分析了美国、中国、阿根廷、巴西、匈牙利及地中海地区的作物需水量和对不同的气候变化因子(主要是温度、降水、CO<sub>2</sub>)的响应,另外 Cynthia 从管理规划和持续发展的角度,对未来生态系统的服务和灌水决策进行了评估。Thomas<sup>[75]</sup>利用 FAO 的水分平衡模型和 GIS 数据,模拟了中国地区当前以及未来气候情境下,多种作物在产量最大时的农业灌溉需求量,指出在未来气候场景下,中国各地区的灌溉需求量会有不同程度的增加。Weatherhead 等<sup>[76]</sup>综合考虑农业政策、技术发展、市场等多种因素,基于 MAFF 灌溉调查数据,利用回归和 GIS 方法计算理论灌溉需求和灌水深度,预测了英格兰和威尔士未来的灌溉需求,结果表明在干旱年作物净灌溉需水量将增长至  $244 \times 10^6 \text{ m}^3$ (2021 年)。Yoo 等<sup>[77]</sup>利用 Penman-Monteith 公式和频率分析方法计算了未来情景 SRE A1B、A2、B1 下韩国的水稻需水量,并与基准年份进行对比以获得 8 个农业灌区的不同未来情境下的水稻需水量变幅。Piao 等<sup>[78]</sup>从多个方面分析了气候变化对中国农业的影响,指出气候变化对作物生产有利亦有弊,如气候变暖不利于雨养作物,但对灌溉作物有益;区域性的气候变换将延长作物的生长时间,部分作物的生长线北移等等。Vanuytrecht<sup>[79]</sup>等在实现对 AquaCrop 模型进行水分生产力函数的校正后,分析了 CO<sub>2</sub>浓度的上升对作物生长的不同阶段的影响。Francisco<sup>[80]</sup>等分析了智利中部 Maipo 盆地在降水减少、山区气温上升 3—4 °C 时水文气象参量的变化,利用日水配额预算模型模拟灌溉需求,结果表明,这些气候因素的变化会对不同作物产生不同的影响,

而且未来气候的变化将不利于流域集水。Mainuddin 等<sup>[81]</sup>利用 PRECIS 区域气候模型的未来气候场景数据驱动 Aquacrop 模型,模拟了 2010—2050 年湄公河流域下游水稻的水生产力(产量比实际蒸散量),结果显示湄公河流域在老挝和泰国境内的水稻的水生产力可能会显著增加而在柬埔寨和越南境内的水稻的水生产力可能会减少。

国内研究多以 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式为基础,结合气象数据<sup>[82-83]</sup>、作物系数<sup>[84-87]</sup>、农田水量平衡方程<sup>[88]</sup>,进行当前或未来的灌溉需水量及其长期变化趋势的分析。另外,系统动力学建模方法<sup>[89]</sup>、作物模型与未来气候模型耦合<sup>[71]</sup>的分析方法也被应用于此项研究中。研究结果普遍表明,在中国西部(新疆<sup>[90]</sup>、甘肃<sup>[87]</sup>、河西走廊<sup>[86]</sup>、张掖市<sup>[91]</sup>、黑河流域<sup>[92]</sup>、关中地区<sup>[88]</sup>)、中部平原(河南<sup>[93]</sup>、黄淮流域<sup>[82]</sup>)、东北(辽宁营口<sup>[94]</sup>)长江流域(长江中下游地区<sup>[85,95-96]</sup>、高邮灌区<sup>[83]</sup>)乃至全国<sup>[84]</sup>等多个研究区,多种作物的灌溉需水量在历史和未来情景分析中呈增加趋势,且增加幅度因作物类型及种植习惯不同而存在差异。

#### 4 讨论

以上研究提供了有关灌溉对气候影响的观测证据和模拟结果,丰富了人类活动与气候变化的响应研究,但仍然存在一些不足:首先,尽管观测实证和模拟结果都显示灌溉对气候的确存在影响,大多数研究显示灌溉可以降低温度和增加降水,但是有关灌溉对于晚间表面温度/最低温度<sup>[31]</sup>和降水<sup>[16-17]</sup>的影响方向(增加/降低)结论不一致。其次,灌溉对气候影响强度的定量研究非常困难。气候观测通常提供的是地面调查点的信息,而不是面上信息。由于观测站点背景差异,很难明确将灌溉影响从其他因素对观测点气候的影响中分离开来<sup>[7]</sup>。而模型模拟结果受灌溉模拟参数(比如灌溉位置和灌水量)的影响大,可能过高或者过低的估计了灌溉对气候的影响。灌溉时间和灌溉方式对气候的影响强度是否存在显著差异也没有明确的结论。大多模型中也没有考虑不同作物种类(比如水稻和小麦)灌溉需求上的差异,对作物生长的模拟相对简化。此外,目前灌溉的气候效应影响主要集中在灌溉对过去气候的影响,而对未来灌溉对气候系统的可能影响研究很少,

有研究指出以往的模型中没有考虑到灌溉的作用可能致使以往有关人类活动对气候影响的研究低估了灌区温室气体排放对全球变暖的作用<sup>[5-6,20]</sup>,随着水资源的短缺和不同部门对水资源需求竞争的加强,农田灌溉面积将来的缩减或者灌溉用水量的下降,可能会增加局部地区增温的速率<sup>[5]</sup>。

因此,有关灌溉对区域气候的影响问题有待进一步研究,具体研究内容包括:灌溉对区域气候是否存在影响?影响有多大?是否存在地区差异?是否随时间变化?不同的灌溉方式对区域气候的影响是否存在显著差异?目前气候模型中大多没有考虑灌溉对区域气候的影响,是否会因此而产生模拟误差?是否考虑需要在未来的气候模型中加入对灌溉的模拟?相对于其他人类活动(比如土地利用/覆盖变化),灌溉对区域气候的影响在强度上是否相当?灌溉的制冷作用是否部分抵消了温室气体排放对全球变暖的作用?未来气候变化、水资源短缺以及人类灌溉行为(比如节水灌溉的增加)的变化,可能引起灌区分布范围和灌溉耗水量的变化,由此是否会引起局部地区增温速率的变化?对于这些问题的研究可以帮助人们更好地理解人类活动和气候变化间的响应机制,同时也可以制定应对气候变化的科学策略和措施提供科学依据。

针对上述科学问题以及目前研究中存在的问题,未来灌溉对气候的影响研究应该注重如下几个方面:1)尽管大量的模拟实验显示灌溉对区域气候存在着影响,但是灌溉对区域气候影响的实际证据相对缺乏。未来研究应该在同一研究区同时利用观测数据分析方法和模型模拟研究方法进行灌溉对区域气候的影响,并将两者的结果进行对比分析,以求做到互相验证。2)对于利用气象观测数据进行的研究,一方面要尽量消除观测站点背景差异(比如高程)的影响,另一方面要排除其它人类活动(比如城市化)对区域气候的影响。因此,在气象站点的选择上要特别的注意。3)遥感观测可以提供大尺度的地表参数信息(比如:土壤湿度、反照率、地表温度、植被覆盖等),也可以整合到模型中,对于缺乏地面观测数据或者地面数据受其他因素(比如:城市化)影响大的区域,研究灌溉对气候影响时遥感观测数据可以作为一个有力的潜在工具<sup>[12,15]</sup>。4)在今后的研究中研究者要特别注意对灌溉四大属性的精确模

拟,可以考虑将作物生长模型与气候模型耦合起来,利用作物生长模型估计作物的需水量和灌水时间。此外,在撰写文章的时候也应该明确指出灌溉位置、灌水量、灌溉方式、灌溉时间和具体研究的时间段(比如1980—2000年),以方便不同研究结果的横向比较。5)要注意不同尺度的研究重点有所不同:大型灌区尺度可能更容易获得高精度的灌溉属性数据,从而方便分析不同灌溉条件(比如灌溉时间、方式、强度等)下农田灌溉对局部气候的影响,提供灌溉对区域气候影响实证;区域尺度的研究重在阐述灌溉对区域气候影响的物理机制,以及它们之间的互馈影响;全球尺度的研究则更重视灌溉对气候在全球平均水平上的影响,对比分析不同区域的影响强度差异和成因,探讨农田灌溉对周边非灌溉区的间接影响等。6)目前很多气候模型地表参数化方案里面没有区分旱作作物(小麦、玉米)和水稻。水稻的生长一方面会消耗更多的水资源,增加地表的潜热通量,降低温度,另一方面稻田是大气甲烷的一个重要来源,甲烷对温室效应的贡献是等量二氧化碳的26倍。灌溉稻田对区域气候的影响可能不同于灌溉麦田,因此未来研究中还应该注意区分灌溉的水田和旱地,并将温室气体甲烷的排放对区域气候的影响考虑到模拟研究中。7)各种模型由于物理机理、地表参数化方案等差异,本身也存在很多不确定,利用不同的模型和相同的灌溉参数化方法模拟出的灌溉影响结果可能存在不一致,因此利用多模式集合的方式研究灌溉对区域气候的影响,可以降低由于模型系统误差引起的模拟结果上的差异,帮助我们理解和减少灌溉对气候影响(强度和方向)模拟结果的不确定性。8)目前灌溉对气候的影响研究都是单线程的,而气候变化和灌溉之间存在互馈机制。气候变化本身会导致降水、蒸发等在空间和时间上的变化,这一方面将直接改变地表水资源的格局,另一方面也将引起灌溉需求在时间和空间上的变化,导致人类灌溉行为的改变,灌溉行为的改变又进一步引起区域气候的变化。未来也应该考虑灌溉和气候变化间的互馈影响。

## References:

- [1] Shiklomanov I A. Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, 2000, 25(1): 11-32.
- [2] Siebert S, Doll P, Hoogeveen J, Faures J M, Frenken K, Feick S. Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(5): 535-547.
- [3] Boucher O, Myhre G, Myhre A. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 2004, 22(6/7): 597-603.
- [4] Cui C X, Wei R Q, Qin R. Effects of irrigation on local climate. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(6): 292-295.
- [5] Bonfils C, Lobell D. Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(34): 13582-13587.
- [6] Kueppers L M, Snyder M A, Sloan L C. Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(3), doi: 10.1029/2006GL028679.
- [7] Lobell D B, Bonfils C. The effect of irrigation on regional temperatures: A spatial and temporal analysis of trends in California, 1934—2002. *Journal of Climate*, 2008, 21(10): 2063-2071.
- [8] Mahmood R, Foster S A, Keeling T, Hubbard K G, Carlson C, Leeper R. Impacts of irrigation on 20th century temperature in the northern Great Plains. *Global and Planetary Change*, 2006, 54(1/2): 1-18.
- [9] Zhu X F, Liang S L, Pan Y Z. Observational evidence of the cooling effect of agricultural irrigation in Jilin, China. *Climate Change*, 2012, 114(3/4): 799-811.
- [10] de Vries D A. The influence of irrigation on the energy balance and the climate near the ground. *Journal of Meteorology*, 1959, 16(3): 256-270.
- [11] Douglas E M, Niyogi D, Froking S, Yeluripati J B, Pielke R A, Niyogi N, Vörösmarty C J, Mohanty U C. Changes in moisture and energy fluxes due to agricultural land use and irrigation in the Indian Monsoon Belt. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L14403.
- [12] Zhu X F, Liang S L, Pan Y Z, Zhang X T. Agricultural irrigation impacts on land surface characteristics detected from satellite data products in Jilin Province, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(3): 721-729.
- [13] Zhu X F, Shi P J, Pan Y Z. Agricultural irrigation impacts on land surface parameters detected from satellite data products in Northern China // *Proceedings of the 1st International Conference on Agro-Geoinformatics*. Shanghai: IEEE, 2012: 1-5.
- [14] Barnston A G, Schickedanz P T. The effect of irrigation on warm season precipitation in the Southern Great Plains. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(6): 865-888.
- [15] Lee E, Chase T N, Rajagopalan B, Barry R G, Biggs T W, Lawrence P J. Effects of irrigation and vegetation activity on early Indian summer monsoon variability. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(4): 573-581.

- [16] Lohar D, Pal B. The effect of irrigation on premonsoon season precipitation over south west Bengal, India. *Journal of Climate*, 1995, 8(10): 2567-2570.
- [17] Moore N, Rojstaczer S. Irrigation-induced rainfall and the Great Plains. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(8): 1297-1309.
- [18] Segal M, Pan Z, Turner R W, Takle E S. On the potential impact of irrigated areas in North America on summer rainfall caused by large-scale systems. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 37(3): 325-331.
- [19] Sacks W J, Cook B I, Buening N, Levis S, Helkowski J H. Effects of global irrigation on the near-surface climate. *Climate Dynamics*, 2009, 33(2/3): 159-175.
- [20] Lobell D B, Bala G, Bonfils C, Duffy P B. Potential bias of model projected greenhouse warming in irrigated regions. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(13): L13709.
- [21] Gordon L J, Steffen W, Jönsson B F, Folke C, Falkenmark M, Johannessen Å. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(21): 7612-7617.
- [22] Stidd C K. *Local Moisture and Precipitation*. Las Vegas: University of Nevada, 1967.
- [23] Changnon S A. Weather modification in up or down?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1973, 54(7): 642-646.
- [24] Beebe R C. Large scale irrigation and severe storm enhancement // *Proceedings of the Symposium on Atmospheric Diffusion and Air Pollution*. Santa Barbara: American Meteorological Society, 1974: 392-395.
- [25] Marotz G A, Clark J, Henry J, Standfast R. Cloud fields over irrigated areas in Southwestern Kansas-Data and speculations. *The Professional Geographer*, 1975, 27(4): 457-461.
- [26] Burman R D, Wright J L, Marwitz J D. Climate modification of dry desert air by a large irrigation project // *Proceedings of the 12th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. Illinois: American Meteorology Society, 1975: 33-34.
- [27] Burman R, Wright J, Marwitz J. Inadvertent climate modification near the surface of a large irrigated area // *Proceedings of the 12th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. Tucson: American Meteorological Society, 1975: 10-13.
- [28] Schickedanz P T. *The Effect of Irrigation on Precipitation in the Great Plains*. Urbana, Illinois: University of Illinois, 1976.
- [29] Worthington E B. *Arid Land Irrigation in Developing Countries: Environmental Problems and Effects*; based on the International Symposium 16- 21 February 1976, Alexandria, Egypt. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [30] Mahmood R, Hubbard K G, Carlson C. Modification of growing-season surface temperature records in the Northern Great Plains due to land-use transformation: Verification of modelling results and implication for global climate change. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(3): 311-327.
- [31] Kanamaru H, Kanamitsu M. Model diagnosis of nighttime minimum temperature warming during summer due to irrigation in the California Central Valley. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(5): 1061-1072.
- [32] Ozdogan M, Rodell M, Beaudoin H K, Toll D L. Simulating the effects of irrigation over the United States in a land surface model based on satellite-derived agricultural data. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(1): 171-184.
- [33] Douglas E M, Beltrán-Przekurat A, Niyogi D, Pielke Sr R A, Vörösmarty C J. The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation-A mesoscale modeling perspective. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1/2): 117-128.
- [34] Bansil P C. *Water Management in India*. New Delhi: Concept Publishing Company, 2004.
- [35] de Rosnay P, Polcher J, Laval K, Sabre M. Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 1986, doi: 10.1029/2003GL018024.
- [36] Biggs T W, Scott C A, Gaur A, Venot J P, Chase T N, Lee E. Impacts of irrigation and anthropogenic aerosols on the water balance, heat fluxes, and surface temperature in a river basin. *Water Resources Research*, 2008, 44(12), doi: 10.1029/2008WR006847.
- [37] Mao H Q, Yan X D, Xiong Z, Tian H Q. Modeled impact of irrigation on regional climate in India. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1038-1045.
- [38] Wu P T, Zhao X N. Impact of climate change on agricultural water use and grain production in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 1-6.
- [39] Wu P T, Zhao X N, Feng H, Wang Y B. Agricultural economic rational water consumption and strategy analysis for water saving potential in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(6): 13-17.
- [40] Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, Fang J Y, Li Q X, Kaufmann R K, Tucker C J, Myneni R B. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [41] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Luo Y F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [42] Li J Y, Wang H J. Regional climate effects of large-scale agricultural irrigation related to South-to-North Water Transfer Project in China. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 343-349.

- [43] Zhao Y, Fang Y J, Cui C X, Huang A N. Effects of irrigation on precipitation in the arid regions of Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 2012, 4(2): 132-139.
- [44] Wen L J, Jin J M. Modelling and analysis of the impact of irrigation on local arid climate over northwest China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(3): 445-453.
- [45] Alpert P, Mandel M. Wind variability-An indicator for a mesoclimatic change in Israel. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1986, 25(11): 1568-1576.
- [46] de Ridder K, Gallée H. Land surface-Induced regional climate change in Southern Israel. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 37(11): 1470-1485.
- [47] Geerts B. On the effects of irrigation and urbanisation on the annual range of monthly-mean temperatures. *Theoretical and Applied Climatology*, 2002, 72(3/4): 157-163.
- [48] Haddeland I, Lettenmaier D P, Skaugen T. Effects of irrigation on the water and energy balances of the Colorado and Mekong river basins. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/4): 210-223.
- [49] Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change-A numerical experiment. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(3): 474-490.
- [50] Lobell D, Bala G, Mirin A, Phillips T, Maxwell R, Rotman D. Regional differences in the influence of irrigation on climate. *Journal of Climate*, 2009, 22(8): 2248-2255.
- [51] Puma M J, Cook B I. Effects of irrigation on global climate during the 20th century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D16): 120, doi: 10.1029/2010JD014122.
- [52] Christy J R, Norris W B, Redmond K, Gallo K P. Methodology and results of calculating central California surface temperature trends: Evidence of human-induced climate change? *Journal of Climate*, 2006, 19(4): 548-563.
- [53] Adegoke J O, Pielke R A, Eastman J, Mahmood R, Hubbard K G. Impact of irrigation on midsummer surface fluxes and temperature under dry synoptic conditions: A regional atmospheric model study of the U. S. High Plains. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(3): 556-564.
- [54] Loveland T R, Reed B C, Brown J F, Ohlen D O, Zhu Z, Yang L, Merchant J W. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6/7): 1303-1330.
- [55] Doll P, Siebert S. A Digital Global Map of Irrigation Areas: Report A9901. Kassel (Germany): Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, 1999.
- [56] Siebert S, Döll P. A Digital Global Map of Irrigation Areas — An Update for Latin, America and Europe. Kassel (Germany): Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, 2001.
- [57] Portmann F T, Siebert S, Döll P. Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(1), doi: 10.1029/2008GB003435.
- [58] Thenkabaila P S, Biradar C M, Noojipady P, Dheeravath V, Li Y J, Velpuri M, Gumma M, Gangalakunta O R P, Turrall H, Cai X L, Vithanage J, Schull M A, Dutta R. Global irrigated area map (GIAM), derived from remote sensing, for the end of the last millennium. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(14): 3679-3733.
- [59] Thenkabaila P S, Biradar C M, Noojipady P, Dheeravath V, Li Y J, Velpuri M, Reddy G P O, Cai X L, Gumma M, Turrall H. A global irrigated area map (GIAM) using remote sensing at the end of the last millennium. Colombo (Sri Lanka): International Water Management Institute Report, 2008: 63.
- [60] Thenkabaila P S, Biradar C M, Turrall H, Noojipady P, Li Y J, Vithanage J, Dheeravath V, Velpuri M, Schull M A, Cai X L, Dutta R. An Irrigated Area Map of the World (1999) Derived from Remote Sensing. Research Report 105. Colombo (Sri Lanka): International Water Management Institute, 2006.
- [61] Thenkabaila P, Biradar C, Noojipady P, Cai X L, Dheeravath V, Li Y J, Velpuri M, Gumma M, Pandey S. Sub-pixel area calculation methods for estimating irrigated areas. *Sensors*, 2007, 7(11): 2519-2538.
- [62] Biggs T W, Thenkabail P S, Gumma M K, Scott C A, Parthasaradhi G R, Turrall H N. Irrigated area mapping in heterogeneous landscapes with MODIS time series, ground truth and census data, Krishna Basin, India. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4245-4266.
- [63] Boken V K, Hoogenboom G, Kogan F N, Hook J E, Thomas D L, Harrison K A. Potential of using NOAA-AVHRR data for estimating irrigated area to help solve an inter-state water dispute. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2277-2286.
- [64] Dheeravath V, Thenkabail P S, Chandrakantha G, Noojipady P, Reddy G P O, Biradar C M, Gumma M K, Velpuri M. Irrigated areas of India derived using MODIS 500 m time series for the years 2001—2003. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1): 42-59.
- [65] Ozdogan M, Gutman G. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: An application example in the continental US. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3520-3537.
- [66] Thenkabail P S, Schull M, Turrall H. Ganges and Indus river basin land use/land cover (LULC) and irrigated area mapping using continuous streams of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3): 317-341.
- [67] Wriedt G, van der Velde M, Aloe A, Bouraoui F. A European irrigation map for spatially distributed agricultural modelling.

- Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 771-789.
- [68] Beltran C M, Belmonte A C. Irrigated crop area estimation using landsat tm imagery in La Mancha, Spain. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(10): 1177-1184.
- [69] Abou El-Magd I, Tanton T W. Improvements in land use mapping for irrigated agriculture from satellite sensor data using a multi-stage maximum likelihood classification. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(21): 4197-4206.
- [70] Zhu X D. The Impact of Agricultural Irrigation on Land Surface Characteristics and Near Surface Climate in China [D]. Maryland: University of Maryland, 2012.
- [71] Wang W G, Sun F C, Peng S Z, Xu J Z, Luo Y F, Jiao X Y. Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, (14): 90-98.
- [72] Rosenberg N J, Brown R A, Izaurralde R C, Thomson A M. Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 117(1/2): 73-96.
- [73] Rosenzweig C, Strzepek K M, Major D C, Iglesias A, Yates D N, McCluskey A, Hillel D. Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. Global Environmental Change, 2004, 14(4): 345-360.
- [74] Utset A, Martínez-Cob A, Farré I, Caverro J. Simulating the effects of extreme dry and wet years on the water use of flooding-irrigated maize in a Mediterranean landplane. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 77-84.
- [75] Thomas A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. Global and Planetary Change, 2008, 60(3/4): 306-326.
- [76] Weatherhead E K, Knox J W. Predicting and mapping the future demand for irrigation water in England and Wales. Agricultural Water Management, 2000, 43(2): 203-218.
- [77] Yoo S H, Choi J Y, Nam W H, Hong E. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea. Agricultural Water Management, 2012, 112: 33-42.
- [78] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [79] Vanuytrecht E, Raes D, Willems P. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1753-1762.
- [80] Meza F J, Wilks D S, Gurovich L, Bambach N. Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo Basin, Chile: Reliability of water rights and changes in the demand for irrigation. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(5): 421-430.
- [81] Mainuddin M, Kirby M, Hoanh C T. Water productivity responses and adaptation to climate change in the lower Mekong basin. Water International, 2012, 37(1): 53-74.
- [82] Fang W S, Liu R H, Zhu Z X, Ma Z H, Li S Y, Xu P P. Irrigation water requirement by winter wheat in Huanghuai Plain: Affecting factors and characteristics in different climatic years. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2177-2182.
- [83] Luo Y F, Peng S Z, Wang W G, Jiao X Y, Sun Y, Han B. Impacts of climate change on irrigation water requirements of rice: A case study of Gaoyou Irrigation District. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 609-613.
- [84] Liu Y, Wang L, Ni G R, Cong Z T. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12.
- [85] Li Y, Yang X G, Ye Q, Huang W H. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961—2007. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 175-183.
- [86] Wang H L, Niu J Y, Wang R Y, Lv X D. Impact of climate change on water requirement of main crops in irrigated oasis of Hexi corridor. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(5): 245-251.
- [87] Wang H L, Wang R Y, Zhang Q, Niu J Y, Lü X D. Impact of warming climate on crop water requirement in Gansu Province. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 866-871.
- [88] Li P, Wei X M. Impacts of climate change on agriculture water requirement in irrigation district. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(1): 81-85.
- [89] Wang X J, He R M, Shang M T. Research on regional irrigation water demand under climate change. China Rural Water and Hydropower, 2011, (1): 29-32, 36.
- [90] Hu Y N, Xu Y L, Liu Y J. The adaptability study of irrigation maize on water resource under climate change in Alxa. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(6): 63-68.
- [91] Wang X H, Li Y H, Wang J X. Influence of climate variations to the crop water consumption in Zhangye Region. Yellow River, 2007, 29(10): 61-62, 64.
- [92] Chen J W, Wu J K. Impact of climate change on irrigation water requirement of typical crops in arid irrigation areas in China. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 69-73.
- [93] Cheng L, Liu R H, Wang X L. Possible impacts of future climate change on irrigated winter wheat and adaptive strategies in Henan province. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(5): 571-577.

- [94] Han B, Luo Y F, Wang W G, Peng S Z, Jiao X Y. Impacts of climate change on rice growing period and irrigation water requirements. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 29-32.
- [95] Song N, Sun J S, Wang J L, Chen Z F, Liu Z G. Effects of climate change on irrigation water requirement of early rice in the Yangtze River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 24-28.
- [96] Wang W G, Peng S Z, Sun F C, Xing W Q, Luo Y F, Xu J Z. Spatiotemporal variations of rice irrigation water requirements in the mid-lower reaches of Yangtze River under changing climate. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 656-664.
- 参考文献:
- [4] 崔彩霞, 魏荣庆, 秦榕. 灌溉对局地气候的影响. *气候变化研究进展*, 2006, 2(6): 292-295.
- [37] 毛慧琴, 延晓冬, 熊喆, 田汉勤. 农田灌溉对印度区域气候的影响模拟. *生态学报*, 2011, 31(4): 1038-1045.
- [38] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 1-6.
- [39] 吴普特, 赵西宁, 冯浩, 王玉宝. 农业经济用水量与我国农业战略节水潜力. *中国农业科技导报*, 2007, 9(6): 13-17.
- [42] 李建云, 王汉杰. 南水北调大面积农业灌溉的区域气候效应研究. *水科学进展*, 2009, 20(3): 343-349.
- [71] 王卫光, 孙凤朝, 彭世彰, 徐俊增, 罗玉峰, 缴锡云. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟. *农业工程学报*, 2013, (14): 90-98.
- [82] 方文松, 刘荣花, 朱自玺, 马志红, 李树岩, 许蓬蓬. 黄淮平原冬小麦灌溉需水量的影响因素与不同年型特征. *生态学报*, 2009, 28(11): 2177-2182.
- [83] 罗玉峰, 彭世彰, 王卫光, 缴锡云, 孙勇, 韩冰. 气候变化对水稻灌溉需水量的影响——以高邮灌区为例. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, 42(5): 609-613.
- [84] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 丛振涛. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 6-12.
- [85] 李勇, 杨晓光, 叶清, 黄晚华. 1961-2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 175-183.
- [86] 王鹤龄, 牛俊义, 王润元, 吕晓东. 气候变暖对河西走廊绿洲灌区主要作物需水量的影响. *草业学报*, 2011, 20(5): 245-251.
- [87] 王鹤龄, 王润元, 张强, 牛俊义, 吕晓东. 气候变暖对甘肃省不同气候类型区主要作物需水量的影响. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 866-871.
- [88] 李萍, 魏晓妹. 气候变化对灌区农业需水量的影响研究. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(1): 81-85.
- [89] 王小军, 贺瑞敏, 尚熈廷. 气候变化对区域农业灌溉用水影响分析. *中国农村水利水电*, 2011, (1): 29-32, 36.
- [90] 胡亚南, 许吟隆, 刘颖杰. 气候变化情景下阿拉善盟灌溉玉米对水资源的适应性研究. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 63-68.
- [91] 王新华, 李应海, 王建雄. 气候变化对张掖地区作物需水量的影响. *人民黄河*, 2007, 29(10): 61-62, 64.
- [92] 陈军武, 吴锦奎. 气候变化对黑河流域典型作物灌溉需水量的影响. *灌溉排水学报*, 2010, 29(3): 69-73.
- [93] 成林, 刘荣花, 王信理. 气候变化对河南省灌溉小麦的影响及对策初探. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 571-577.
- [94] 韩冰, 罗玉峰, 王卫光, 彭世彰, 缴锡云. 气候变化对水稻生育期及灌溉需水量的影响. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 29-32.
- [95] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 陈智芳, 刘祖贵. 气候变化对长江流域早稻灌溉需水量的影响. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 24-28.
- [96] 王卫光, 彭世彰, 孙凤朝, 邢万秋, 罗玉峰, 徐俊增. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征. *水科学进展*, 2012, 23(5): 656-664.