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

雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变

白志杰，任丹丹，杨艳敏，胡玉昆，杨永辉

引用本文:
白志杰, 任丹丹, 杨艳敏, 等. 雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1067–1077.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190323

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原种植结构变化对农业需水的影响

Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 8–16 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190490

华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究

Water use and water–saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1454–1464 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180636

近30年吴桥县冬小麦生育期水分亏缺变化趋势分析

Study on water deficit trend in the recent 30 years in Wuqiao County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2015(4): 482–489 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141212

基于CERES–Wheat模型的沧州地区冬小麦需水量分析

Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou Area using CERES–Wheat model

中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1320–1328 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150229

海河流域水资源演变与驱动机制

Advances in clarification of the driving forces of water shortage in Haihe River Catchment

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1443–1453 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180658

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 7 月 第 27 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2019, 27(7): 1067−1077

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190323

白志杰, 任丹丹, 杨艳敏, 胡玉昆, 杨永辉. 雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1067−1077

BAI Z J, REN D D, YANG Y M, HU Y K, YANG Y H. Trend of agricultural plantation and irrigation requirements in the upper reaches of Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1067−1077

雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变*

白志杰[1,2], 任丹丹[1,2], 杨艳敏[1], 胡玉昆[1**], 杨永辉[1**]

(1. 中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室/中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 本文利用作物模型模拟小麦、玉米灌溉需水量, 结合蒸发皿法估算蔬菜、果树等其他作物需水量, 回溯雄安新区上游 1986—2015 年农业种植结构及农业需水的时空演变趋势, 摸清不同作物的需水量比例及时间变化, 并推算了消除降水年际波动的 1970—2015 年农作物灌溉需水量, 探讨单纯人类活动下的农业需水量变化趋势。结果表明, 1986—2015 年, 研究区作物播种总面积总体呈上升趋势, 耕地面积多年平均 84.9 万 hm^2, 有效灌溉面积平均 71.3 万 hm^2, 占总耕地面积的 84%。其中小麦播种面积稍有下降, 玉米、蔬菜播种面积显著增加, 果树种植比例在山区增加、平原区减少。研究区多年平均灌溉需水量 22.52×10^8 m^3, 小麦、玉米、蔬菜、果树和其他作物分别占灌溉需水总量的 58.6%、12.6%、5.8%、16.3%和 6.7%, 受播种面积增加影响, 1970—2015 年, 蔬菜和果树需水显著上升。从空间上来看, 灌溉需水总量在上游山区上升显著, 而在平原区表现为下降; 排除降水的年际波动后, 研究区作物需水自 1970 年以来一直呈上升趋势, 进入 20 世纪 80 年代中期, 虽然整体上升减缓, 但随农业播种总面积增加和蔬菜、水果需水增加影响, 需水量整体呈缓慢上升趋势。因此, 控制上游农业用水, 种植低耗水作物、减少耗水作物的种植面积, 是恢复雄安新区清水产流的关键。

关键词: 雄安新区; 农业种植结构; 灌溉需水量; 作物模型; 蒸发皿法

中图分类号: P339

文章编号: 2096-6237(2019)07-1067-11 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Trend of agricultural plantation and irrigation requirements in the upper reaches of Xiong'an New Area*

BAI Zhijie[1,2], REN Dandan[1,2], YANG Yanmin[1], HU Yukun[1**], YANG Yonghui[1**]

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-Saving Agriculture / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The agriculture is a major consumer of water. Since Xiong'an New Area is facing serious water shortage and groundwater declining, it is necessary to optimize the scale of upstream agriculture water use. By using crop models for simulating the irrigation requirements of wheat and maize, and taking the Pan-evaporation coefficient (K_p) approach to estimate the irrigation requirement of other crops, such as vegetables and fruit trees, our study reconstructed the spatial and temporal trend

* 国家水专项课题(2018ZX07110001)、国家自然科学基金(41671021)和国家重点研发计划项目(2017YFD0300908-2)资助

** 通信作者: 胡玉昆, 主要从事农业用水与地下水模拟研究, E-mail: huyk@sjziam.ac.cn; 杨永辉, 主要从事水循环及其农业水资源等相关研究, E-mail: yonghui.yang@sjziam.ac.cn

白志杰, 研究方向为生态水文。E-mail: zjbai@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2019-03-24 接受日期: 2019-04-26

* This study was supported by the National Water Special Project of China (2018ZX07110001), the National Natural Science Foundation of China (41671021) and the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0300908-2).

** Corresponding authors: HU Yukun, E-mail: huyk@sjziam.ac.cn; YANG Yonghui, E-mail: yonghui.yang@sjziam.ac.cn

Received Mar. 24, 2019; accepted Apr. 26, 2019

of agriculture plantation and irrigation requirement in the upper reaches of Xiong'an New Area from 1970. The proportion of irrigation requirements and time-dependent changes of different crops formed a clear trend. The results showed that the total planting area generally increased. There was no significant change in the area of cultivated land and the effective irrigated area. The average cultivated area for many years was 849 000 hm^2, while the effective irrigated area averaged 713 000 hm^2, accounting for 84% of the total cultivated land area. The planting area of wheat decreased slightly, the planting areas of maize and vegetables increased significantly, and the planting proportion of fruit trees increased in the mountain area and decreased in the plain area. The annual average irrigation requirement was 22.52×10^8 m^3, of which wheat, maize, vegetables, fruit trees, and other crops accounted for 58.6%, 12.6%, 5.8%, 16.3%, and 6.7% of the total irrigation requirement, respectively. The irrigation requirement of vegetables and fruit trees increased significantly, and was affected by the increase in planting area. Spatially, the total irrigation requirement increased significantly in the mountain area but decreased in the plain area. After elimination of the influence of annual precipitation fluctuation, the irrigation requirement showed a sharply increasing trend from 1970 to 2015, but slowed down in the mid-1980s. Owing to the increase of planting area and irrigation requirements of vegetables and fruit trees, the irrigation requirement showed a slow increasing tendency overall. Therefore, controlling the agricultural water use in the upper mountainous reaches of Xiong'an New Area, planting of low-water-consuming crops and reducing the planting area of water-consuming crops are keys to restoring water production for Xiong'an New Area. Finally, the sustainable utilization of regional water resources should be based on local natural conditions and the layout of agricultural production should be arranged in accordance with the spatial and temporal distribution of water resources to seek a coordinated development for the water-ecology-social economy of Xiong'an New Area.

Keywords: Xiong'an New Area; Agricultural plantation; Crop irrigation requirement; Crop model; Pan-evaporation coefficient approach

农业是用水大户，目前我国农业用水占总用水的 70%左右[1-3]，世界上大多数干旱、半干旱、半湿润地区的水资源短缺与农业用水有关。从流域尺度来看，上游农业用水增加是造成流域内地表径流量减少的主要原因[4-5]，由于上游径流减少，下游农业生产大量依靠超采地下水[6-8]，导致区域水问题突出。因此，准确计算流域上游农业用水，水资源和粮食产供需间的耦合调控，是保障流域水资源安全和生态经济协同发展的关键。白洋淀地处雄安新区规划的核心范围，自 1970 年以来，由于农业灌溉发展和上游城市扩张，白洋淀来水逐渐减少且周围地下水超采严重[9-11]，淀区周围地下水位由 20 世纪 60 年代初的普遍高于淀区水位到 80 年代初西南方向渐渐低于淀区水位再到 21 世纪初普遍低于淀区水位，形成白洋淀从获取周围地下水侧向补给转向周围地下水侧向渗漏[12]，直接和间接造成白洋淀湖面萎缩、长期靠外流域调水维持不干淀的被动局面。鉴于外流域调水无法有效缓解白洋淀流域来水逐年萎缩、地下水持续下降的事实，摸清雄安新区上游农业需水的基本状况及其演变规律，优化调整雄安新区上游农业用水结构，削减地表和地下水消耗，是提升雄安新区水资源保障能力，实现雄安新区及京津冀绿色可持续发展的根本措施和必然选择。

农业用水估算一直是农业灌溉和排水管理的核心，以能量平衡为驱动的 Penman-Monteith 公式[13]是估算潜在蒸散发的经典方法，1990 年联合国粮农组织(FAO)对 Penman-Monteith 公式进行了标准化修订，简化了计算参考蒸散的 Penman-Monteith 公式所需各种参数，发展了利用作物系数法估算需水量的通用方法，建立了不同作物的参考系数[14]，为作物耗水估算提供了基础理论支撑。然而，不同地区缺乏具体作物本地化的作物系数，尽管蒸发皿蒸发和作物表面蒸散存在差异，但是采用蒸发皿法估算 10 d 或更长时间的潜在蒸散还是有一定保证的[13]。作物模型作为基于日尺度气象数据进行作物生长和水分平衡模拟的工具，经过各国的本地化参数校验，估算作物需水量的精度大大提高[15-17]，使得作物模型和 FAO56 算法进行作物需水研究的方法体系逐渐形成。Yang 等[18]利用 DSSAT 模型模拟华北平原小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)等作物的灌溉需水量，得出小麦灌溉需水量占灌溉需水总量 40%以上；马林等[19]利用 ETWatch 系统估算了华北平原灌溉需水量的分布特征，得出小麦和蔬菜播种面积较多的区域灌溉需水量较高。虽然这些研究已经对华北平原的灌溉需水量进行了估算，但缺乏长时间系统的对种植结构变化、农业需水时空演变规律的研究，尤其是针对白洋淀流域灌溉需水的研究较少。

因此，本研究利用作物模型进行雄安新区上游主要作物小麦、玉米需水模拟，结合华北地区多年研究基础上本地化的蒸发皿系数估算蔬菜、果树等农田需水，回溯雄安新区上游 1970 年特别是 20 世纪 80 年代中期以来农业种植结构及需水量的时空

演变趋势，量化非气象因素驱动的农业种植结构和灌溉行为对水资源影响，为绿色雄安水城共融建设的水资源保障决策提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于白洋淀(雄安新区上游，113°39′~116°18′E，38°05′~40°09′N)，隶属海河流域大清河水系，地势自西北向东南倾斜，海拔跨度 5~2 740 m(图 1)。研究区属于半湿润气候，年均气温 7.3~12.7 ℃，多年平均降水 528 mm，但降水主要集中在雨季，非雨季农作物主要依靠灌溉弥补土壤墒情不足，造成区域地表、地下水短缺。此外，本研究以大清河流域山区和平原区分界限为基准，将研究区分为山区和平原区两部分。在研究区域中，山区包括河北省涞源县、涞水县、易县、唐县、顺平县、阜平县、曲阳县、行唐县、满城区和山西省灵丘县等 10 个县，平原区包括河北省安国县、安新县、定州市、高碑店、高阳县、容城县、徐水县、望都县、无极县、蠡县、博野县、定兴县、新乐市、涿州市、保定市市辖区、清苑县 16 个县或市。

1.2　农业种植结构

1986—2015 年间，该区农田主要种植冬小麦、玉米、蔬菜和果树类，其中冬小麦、夏玉米多为一年两作；果树以苹果(*Malus domestica*)、梨树(*Pyrus* spp.)、桃(*Amygdalus persica*)、葡萄(*Vitis vinifera*)和枣(*Ziziphus jujuba*)为主，占果树种植面积的 80%左右，栽培期为 4—10 月。蔬菜主要包括 25 种露地蔬菜，随着人们生活需求的提升，设施蔬菜急剧增加，因此也应考虑在内。此外，研究区域还少量种植大豆(*Glycine max*)、花生(*Arachis hypogaea*)、棉花(*Gossypium* spp.)、红薯(*Dioscorea esculenta*)、谷类等作物，这些作物主要在雨季生长，灌溉需水较少。

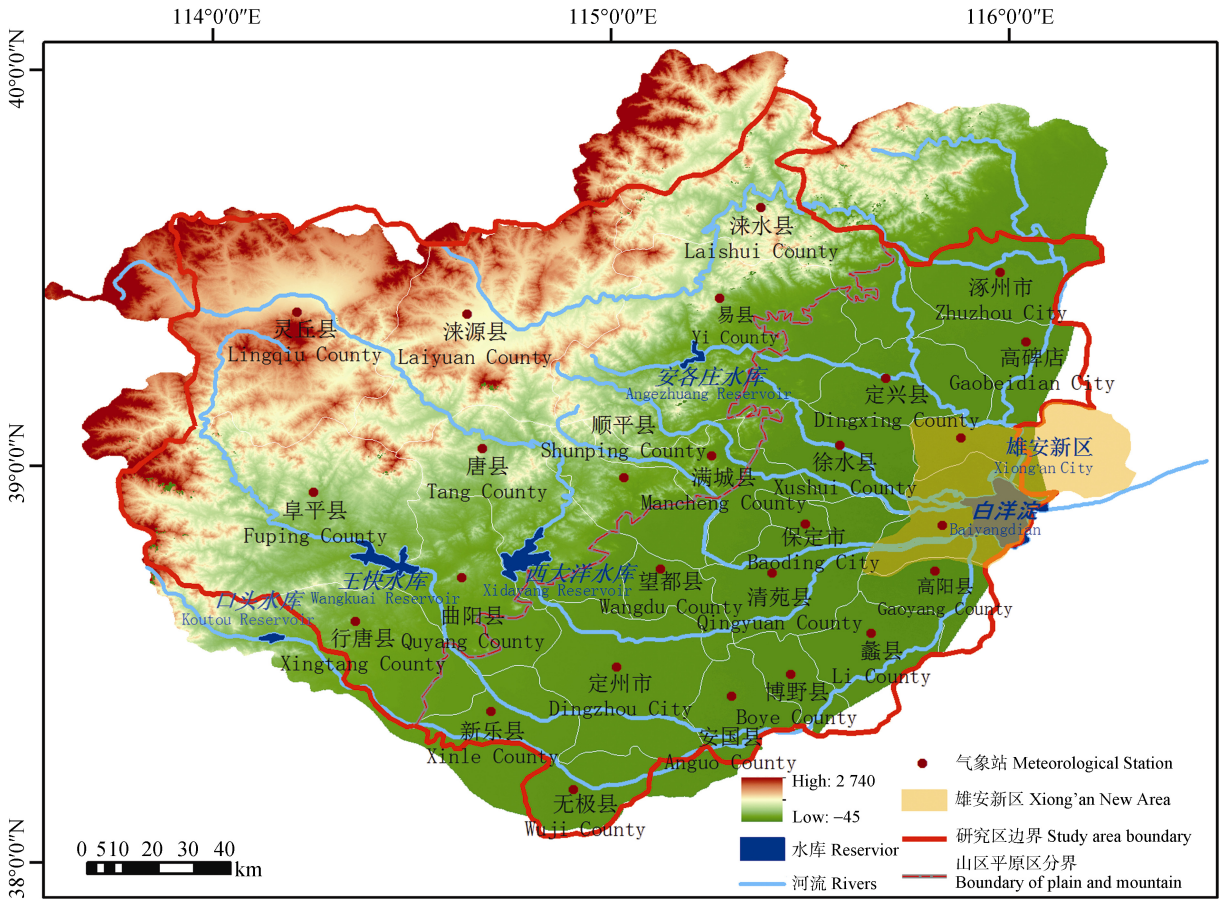

图 1　研究区域边界、气象站、河流水系分布图

Fig. 1　Sketch map of boundary, meteorological stations and river systems in the study area

1.3　数据来源

逐日气象数据从中国气象数据网(http://data.cma.cn/)和河北省气象局获取，涵盖区内 26 个气象站，数据包含作物模型和 Penman-Monteith 方法所需的日最高和最低气温、降水量、风速、太阳辐射和相对湿度。小麦、玉米、果树(苹果、桃树、梨树、葡

萄和枣树)以及 25 种蔬菜的耕作、播种和有效灌溉面积从河北省统计局农村处(1986—1993 年)、中国知网(http://www.c nki.net/)(1994—2015 年)统计年鉴和河北林业网(http://www.hebly.gov.cn/)收集。蔬菜和果树的蒸发皿系数来自参考文献[20-24](表 1)。此外，由于 1985 年以前基本统计数据缺乏和不完备，1970—1985 年各县播种总面积、部分县各作物播种面积、有效灌溉面积从各县县志中提取。

表 1 研究区蔬菜和果树的蒸发皿系数(K_p)

Table 1 Pan-evaporation coefficient (K_p) for cultivated vegetables and fruit trees in the study area

设施蔬菜 Greenhouse vegetable					
草莓 *Fragaria × ananassa*	0.51	菜花 *Brassica oleracea* var. *botrytis*	0.84	豆角 *Vigna unguiculata*	0.73
韭菜 *Allium tuberosum*	0.63	黄瓜 *Cucumis sativus*	0.95	茄子 *Solanum melongena*	1.00
甘蓝 *Brassica oleracea*	0.73	番茄 *Lycopersicon esculentum*	0.84	西葫芦 *Cucurbita pepo*	0.58
甜椒 *Capsicum annuum* var. *grossum*	0.88				
露地蔬菜 Outdoor vegetable					
春架豆 *Vigna unguiculata* in spring	0.73	春黄瓜 *Cucumis sativus* in spring	0.95	早茄子 Early *Solanum melongena*	1.00
秋架豆 *Vigna unguiculata* in autumn	1.18	秋黄瓜 *Cucumis sativus* in autumn	1.41	晚茄子 Later *Solanum melongena*	1.00
春芹菜 *Apium graveolens* in spring	1.13	春菜花 *Brassica oleracea* var. *botrytis* in srping	0.84	大葱 *Allium fistulosum*	1.03
秋芹菜 *Apium graveolens* in autumn	1.23	秋菜花 *Brassica oleracea* var. *botrytis* in autumn	1.09	大蒜 *Allium saticum*	0.86
大白菜 *Brassica pekinensis*	1.34	番茄 *Lycopersicon esculentum*	0.84	马铃薯 *Solanum tuberosm*	0.83
春甘蓝 *Brassica oleracea* in spring	0.73	白萝卜 *Raphanus sativus*	1.22	洋葱 *Allium cepa*	0.66
秋甘蓝 *Brassica oleracea* in autumn	1.18	胡萝卜 *Daucus carota*	1.14	甜椒 *Capsicum annuum* var. *grossum*	0.88
韭菜 *Allium tuberosum*	0.63	西瓜 *Citrullus vulgaris*	0.89	甜瓜 *Cucumis melo*	0.83
西葫芦 *Cucurbita pepo*	0.58				
果树 Fruit tree					
梨树 *Pyrus* spp.	0.97	苹果 *Malus domestica*	0.61	桃树 *Amygdalus persica*	0.47
枣树 *Ziziphus jujuba*	0.46	葡萄 *Vitis vinifera*	0.92		

1.4 作物需水量计算方法

本研究利用 DSSAT 作物模型中的小麦、玉米模型模拟计算小麦、玉米的灌溉需水量，利用 FAO-56 提供的蒸发皿法估算蔬菜、果树需水量；除这几种主要作物外，研究区内还有少量的大豆、棉花、花生、红薯等作物，生长季与玉米基本相同，因此假定所有其他作物的蒸散量与玉米的蒸散量相等。此外，根据相关文献设定设施蔬菜的蒸散量为露地蔬菜蒸散量的 50%[25]。

1.4.1 蒸发皿法

蒸发皿法用于估算蔬菜和果树的蒸散量，方程为：

$$ET_i=K_{pi}\times ET_{pan} \quad (1)$$

式中：ET_i(mm·d^{-1})是蔬菜或果树的蒸散量，K_{pi} 是蒸发皿系数；ET_{pan}(mm·d^{-1})是蒸发皿蒸发速率，由 Penman 公式计算得出。

1.4.2 作物模型 DSSAT

DSSAT 模型[26]是一种基于天气、土壤、作物品种和管理实践的模型，用于模拟作物生长和农业用水。其中 CERES-Wheat 和 CERES-Maize 模块模拟了小麦和玉米从播种前一直到收获后一段时间作物的光合作用、生物量形成和分配以及水与养分供应等物候过程。利用中国科学院栾城农业生态系统试验站大型称重式蒸渗仪连续 5 年长期观测的数据对 CERES-Wheat 和 CERES-Maize 模块模拟的小麦、玉米蒸散量进行了校准，使用 15 年(1987—2001 年)该站作物生长过程中土壤和气候数据进行了验证[15,27]。

1.4.3 灌溉需水量计算

灌溉需水量(RIA)用来定义维持当前农业生产所需最低灌溉量。本文以县为单元进行 RIA 的计算，每个县 RIA 计算如下：

$$RIA(i,j)=IRR(i,j)\times LA(i,j)\times PT(i,j)\times 10 \quad (2)$$

式中：i 和 j 分别代表农作物和县；IRR(mm·d^{-1})是蒸散量 ET(mm·d^{-1})与降水量 P(mm·d^{-1})之差；LA(hm^2)是播种面积；PT 是灌溉面积占耕地面积的百分比，即有效灌溉面积比率。

因此，雄安新区上游农作物小麦、玉米、蔬菜

和果树的总灌溉量 RIA_{sum} 计算为:

$$RIA_{sum}=\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{26}[IRR(i,j)\times LA(i,j)\times PT(i,j)\times 10] \quad (3)$$

除上述主要作物外, 大豆、花生、小米、薯类和芝麻等大部分其他作物主要是夏季作物, 并且在雨季生长。因此, 将其他作物的灌溉需求与玉米的灌溉需求结合计算, 公式为:

$$RIA_{oth}=(RIA_{maize}\times A_{oth})/A_{maize} \quad (4)$$

式中: RIA_{oth} 是所有其他作物的所需灌溉量($m^3\cdot d^{-1}$), RIA_{maize} 是玉米的所需灌溉量($m^3\cdot d^{-1}$), A_{maize} 是玉米的播种面积(hm^2), A_{oth} 是所有其他作物的播种面积(hm^2)。研究区域总的灌溉需水量 RIA_{tot}($m^3\cdot d^{-1}$)计算如下:

$$RIA_{tot}=RIA_{sum}+RIA_{oth} \quad (5)$$

2　结果与分析

2.1　研究区农业种植结构时空演变趋势

图 2 为研究区 1986—2015 年农业种植结构的年际变化。研究区农作物耕地面积和有效灌溉面积变化并不显著, 耕地面积多年平均 84.9 万 hm^2, 其中, 有效灌溉面积平均 71.3 万 hm^2, 占总耕地面积的 84%(图 2a)。播种面积多年平均 126.8 万 hm^2, 其中小麦、玉米、蔬菜、果树和其他作物各占 35.4%、35.1%、8.8%、8.5%和 12.2%, 是研究区主要耗水作物。由于 80%的降水发生在 6 月至 9 月, 冬小麦主要通过地下水灌溉补充所需水份。自 1986 年以来, 小麦的播种面积从 42%下降到 32%, 而玉米播种面积每年以 0.5 万 hm^2 的速度稳步增加, 播种面积占比从 32%增加到 45%。随着人们生活水平的提高, 蔬菜和果树的播种面积也在增加, 蔬菜面积占比从 4%增加到 13%, 果树从 4%增加到 10%。而其他作物的播种面积不断下降, 从 1986 年的面积占比 18%下降到 2015 年 6%(图 2b), 可能是因为其他作物像大豆目前主要依靠进口, 而改种玉米、蔬菜或者果树[28]。

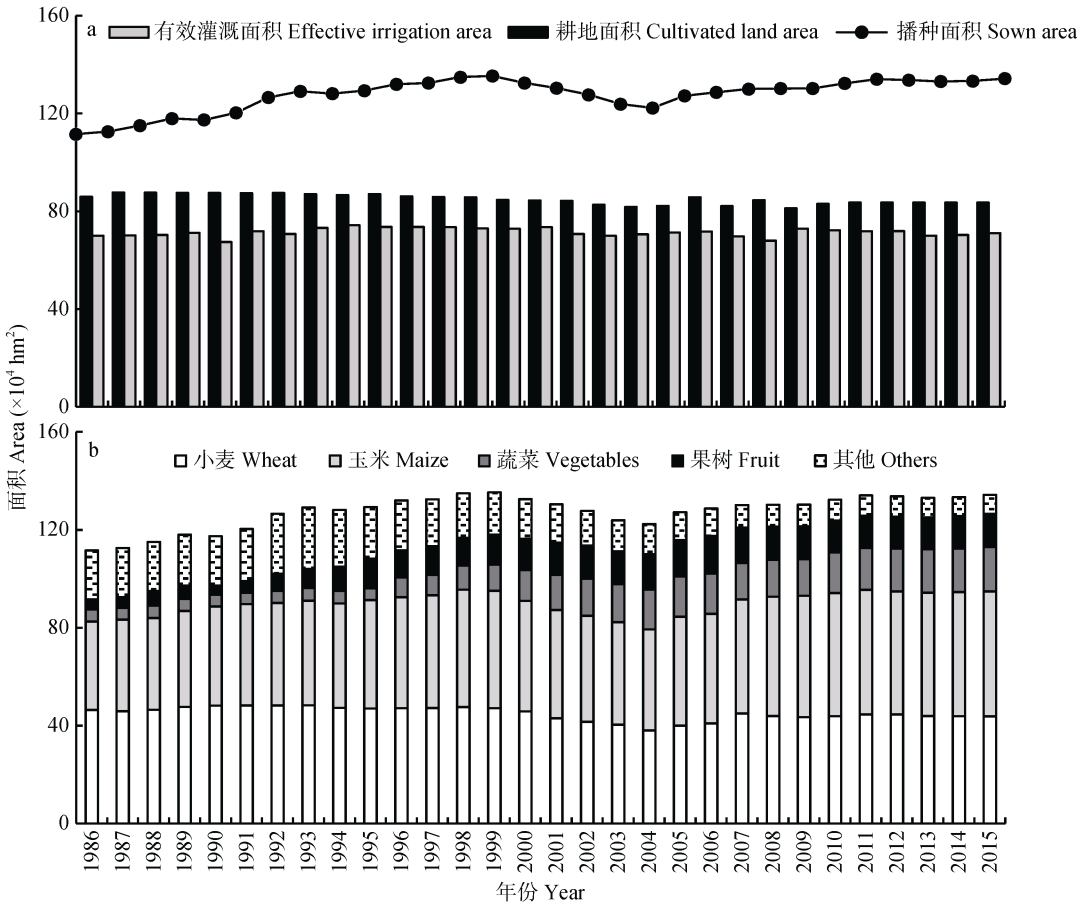

图 2　1986—2015 年研究区耕地面积、有效灌溉面积(a)和各作物播种面积(b)的变化

Fig. 2　Changes of cultivated area, effective irrigation area (a) and sown area of various crops (b) in the study area from 1986 to 2015

图 3 为研究区各县小麦、玉米、蔬菜、果树、其他作物播种面积和播种总面积的变化趋势和显著性水平。通过非参数 Sen 方法和 Mann-Kendall 统计检验方法[29-30]计算和检测各县农作物播种面积变化趋势以及

显著性水平，分别得出研究区显著上升、显著下降、不显著上升、不显著下降 4 种变化。发现研究区小麦播种面积在上游山区显著下降，而在平原区则上升和下降并存(图 3A)；上游各县玉米播种面积呈上升趋势，但多未达显著水平(图 3B)；蔬菜播种面积总体呈显著上升趋势(图 3C)；果树面积变化有一定空间规律，表现为上游山区大部分呈上升趋势，而平原部分呈下降或显著下降的趋势(图 3D)；其他作物整体呈显著下降趋势(图 3E)；而研究区播种总面积大部分地区呈上升或显著上升趋势，只有少数县呈下降趋势(图 3F)。

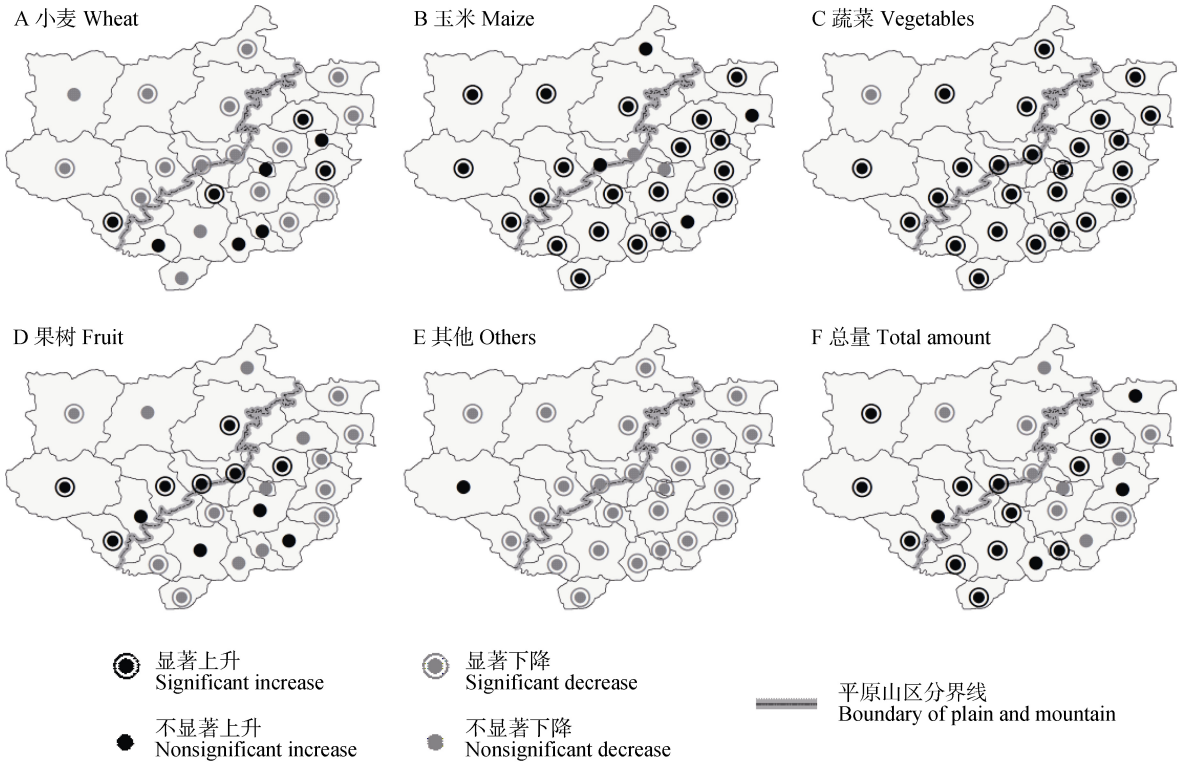

图 3 1986—2015 年研究区各县作物种植面积和播种总面积变化趋势及显著性水平

Fig. 3 Spatial changes of the sown areas of crops in counties of the study area from 1986 to 2015

2.2 研究区农作物灌溉需水量

图 4 为研究区 1986—2015 年期间农作物年均灌溉需水量的变化。研究区 30 年间农作物灌溉需水量的最低、最高和平均值分别是 9.57×10^8 m^3(1990 年)、30.11×10^8 m^3(1997 年)和 22.52×10^8 m^3。小麦、玉米、蔬菜、果树和其他作物的年均灌溉需水量变化范围分别是 6.12×10^8~18.99×10^8 m^3、0.04×10^8~7.27×10^8 m^3、0.29×10^8~2.68×10^8 m^3、1.00×10^8~5.45×10^8 m^3 和 0.01×10^8~4.68×10^8 m^3，相应平均值分别为 11.59×10^8 m^3、2.87×10^8 m^3、1.18×10^8 m^3、3.29×10^8 m^3 和 1.49×10^8 m^3，分别占灌溉需水总量的 58.6%、12.6%、5.8%、16.3% 和 6.7%。其中，小麦灌溉需水量最高，主要是因为小麦的耕作期持续了几乎整个旱季(250 d 左右)。特别是在降水量多的年份，小麦的灌溉需水量可高达灌溉总需水量的 68%，因为雨季生长的玉米、蔬菜、果树几乎不需要灌溉，而冬小麦需要较少的秋季灌溉。

研究区农作物灌溉需水量变化受降水量年际波动影响很大。1997 年、1999 年、2006 年和 2014 年降水少的年份灌溉需水量分别是 29.98×10^8 m^3、27.42×10^8 m^3、22.25×10^8 m^3 和 25.30×10^8 m^3，年降水量仅分别为 371.8 mm、382.02 mm、365.41 mm 和 345.5 mm。相反，1988 年、1990 年、1995 年和 2008 年等降水量多的年份灌溉需水量分别是 14.05×10^8 m^3、9.56×10^8 m^3、15.88×10^8 m^3 和 11.25×10^8 m^3，而年降水量高达 809.68 mm、705.44 mm、757.77 mm 和 648.54 mm，需水量远低于干旱年份。

图 5 为研究区 1986—2015 年间农作物年均灌溉需水量变化趋势。通过 Z-score 将灌溉需水量进行标准化(纵轴)，利用最小二乘法(OLS)和 t 检验[31-32]分别计算各作物灌溉需水量的趋势变化(β)和显著性($P<0.05$)。结果表明，研究区 30 年间小麦和玉米的灌溉需水量均呈下降趋势($\beta_{小麦}=-0.033\ 0$, $\beta_{玉米}=-0.007$)，但下降趋势并不显著($P_{小麦}=0.120$, $P_{玉米}=0.763$)。其中，小麦灌溉需水量的下降程度比玉米大，主要是由于小麦播种面积减少。夏玉米灌溉需水量变化波动较大，主要与雨季降水波动有关。受蔬菜、果树播种面积增加影响，其灌溉需水量均呈显著上升趋势($\beta_{蔬菜}=0.058$, $\beta_{果树}=0.072$;

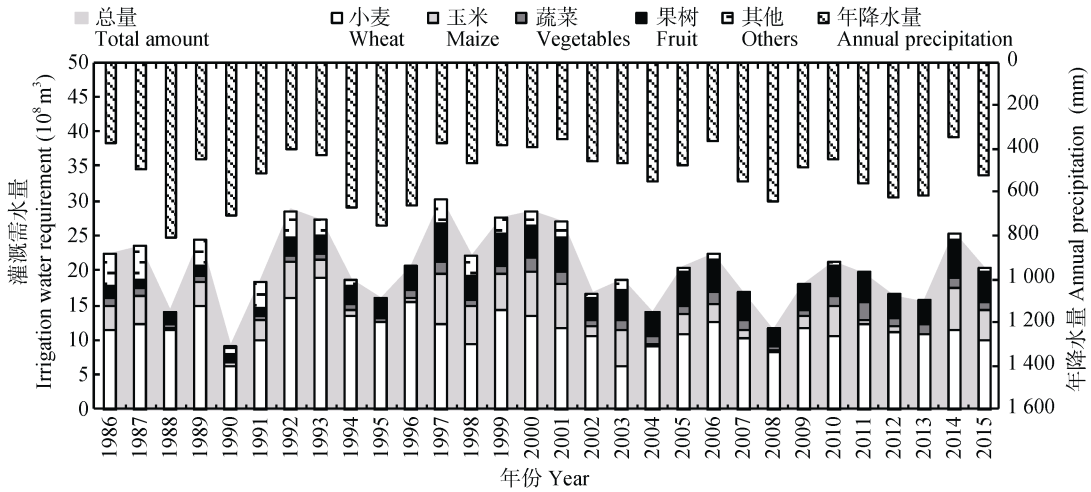

图 4　1986—2015 年研究区农作物灌溉需水量变化

Fig. 4　Time-series of annual average irrigation water requirements of crops in the study area from 1986 to 2015

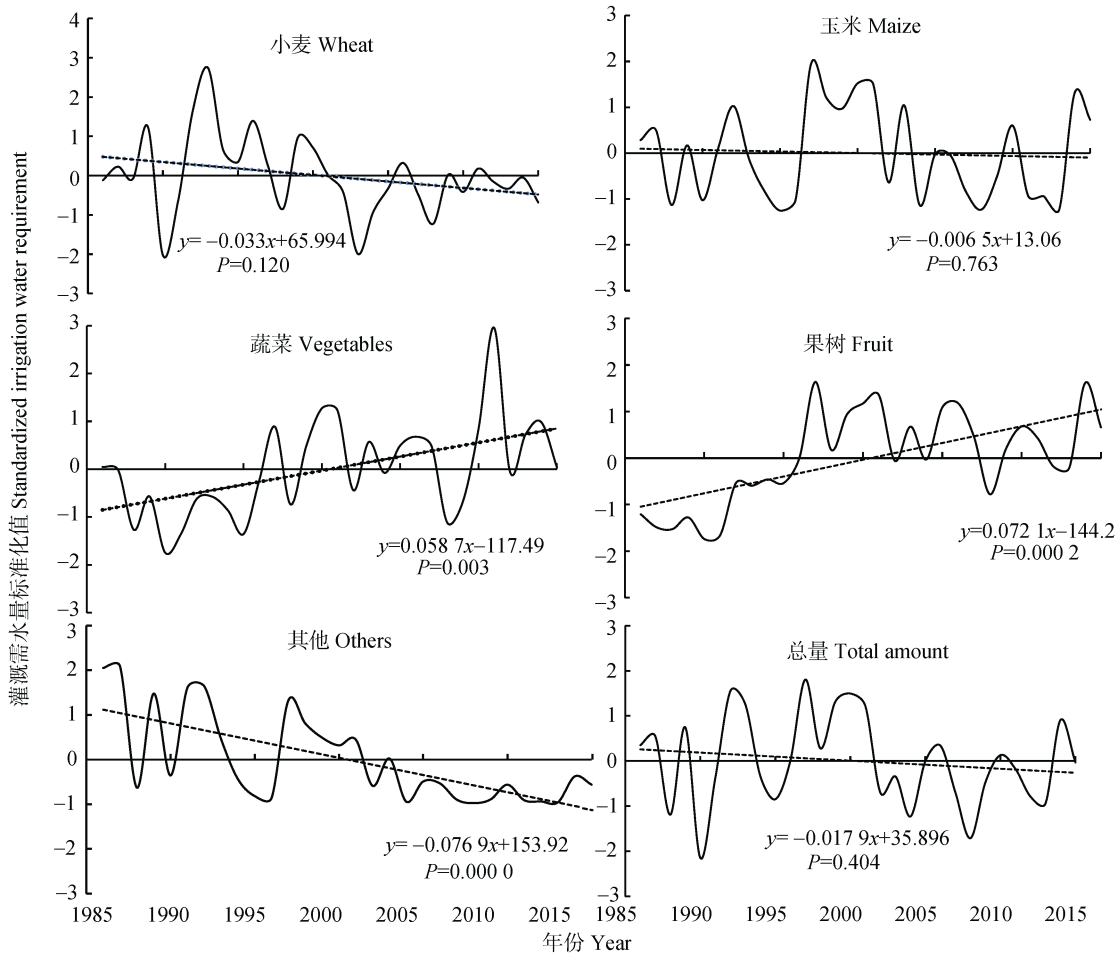

图 5　1986—2015 年研究区农作物灌溉需水量变化趋势

Fig. 5　Trends of irrigation water requirements of crops in the study area from 1986 to 2015

$P_{蔬菜}$=0.003, $P_{果树}$=0.000)。其他作物因播种面积下降, 其灌溉需水量呈显著下降趋势($\beta_{其他}$=−0.077; $P_{其他}$=0.000)。从整体上来说, 雄安新区上游 30 年间农作物灌溉需水总量呈下降趋势, 但没有达到显著水平。

2.3　研究区农作物灌溉需水量空间变化

图 6 为研究区 1986—2015 年间各县农作物灌溉需水量空间变化趋势。同样使用非参数 Sen 方法和 Mann-Kendall 统计检验方法得出各县农作物灌溉需水

量变化趋势以及显著性水平。小麦灌溉需水量大部分地区呈下降或显著下降趋势，而上升和个别显著上升的县分布在平原区(图 6A)；玉米灌溉需水量具有很大空间变化，上升趋势主要集中在研究区北部，下降趋势主要集中在研究区南部(图 6B)；蔬菜灌溉需水量大部分地区表现为显著上升趋势，平原区部分地区表现为下降或显著下降趋势(图 6C)；沿太行山山麓，果树在平原区呈下降或显著下降趋势，在山区则表现为上升或显著上升的趋势(图 6D)；而由于播种面积的显著下降，其他作物灌溉需水量也呈下降或显著下降的趋势(图 6E)。因为研究区气候变化在空间上差异很小，造成小麦、玉米、蔬菜、果树和其他作物空间趋势变化的主要原因是播种面积的变化。最后，沿太行山山麓，各县灌溉需水总量在平原区主要表现为下降或显著下降趋势，其中，不显著下降是平原区最主要的变化趋势，而山区则表现为上升或显著上升的趋势(图 6F)。

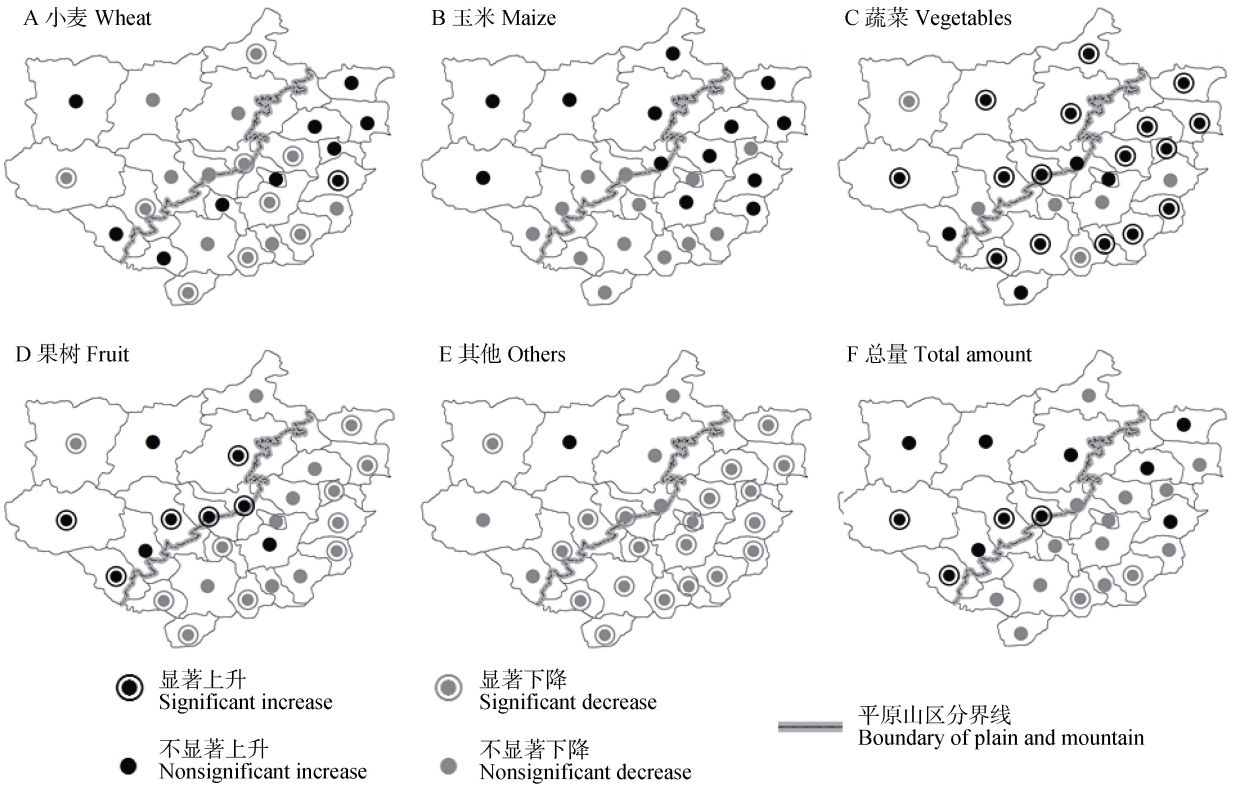

图 6 1986—2015 年研究区各县农作物灌溉需水量空间变化趋势以及显著性水平

Fig. 6 Spatial changes of the irrigation water requirements of crops in counties of the study area from 1986 to 2015

2.4 农业种植结构和灌溉演变对灌溉需水量的影响

以上研究表明，降水是农作物灌溉需水量年际波动的关键影响因素。为了消除降水年际波动对灌溉需水量的干扰，清晰刻画人类活动即灌溉、种植结构对灌溉需水的影响，研究选取 1986—2015 年间最具代表性的降雨年型 2015 年，该年度年降水 526 mm，最接近研究区多年平均降水 528 mm，且 80%的降水集中在 6—9 月，符合研究区降水季节分布特征。研究以 2015 年降水数据为基准进一步得到仅播种面积和灌溉变化影响下 1986—2015 年的灌溉需水量。同时，我们根据 1970—1985 年各县播种总面积和个别县各作物播种面积比例及有效灌溉比例，推算研究区 1970—1985 年农作物灌溉需水量，重建 1970—2015 年雄安新区上游农业灌溉需水演变趋势(图 7)。结果表明，自 1970 年以来，研究区农作物灌溉需水量急剧增加，从 1970 年 8.77×10^8 m^3 到 1986 年的 16.04×10^8 m^3，增长了 90.4%；进入 20 世纪 80 年代中期后，需水量及需水总量呈趋势增长放缓，主要受玉米、蔬菜、果树播种面积增加影响，农田灌溉需水量从 1986 年的 16.04×10^8 m^3 到 1998 年的 20.86×10^8 m^3，之后受我国整体粮食增产降低影响，2004 年达到阶段内的低水平，2005 年后，重新进入缓慢增长。因此，人类活动影响下农业灌溉需水量仍呈缓慢上升趋势。

3 结论与讨论

农业是耗水大户，面对雄安新区严峻的水资源短缺和上游不断下降的地下水漏斗，优化上游耗水

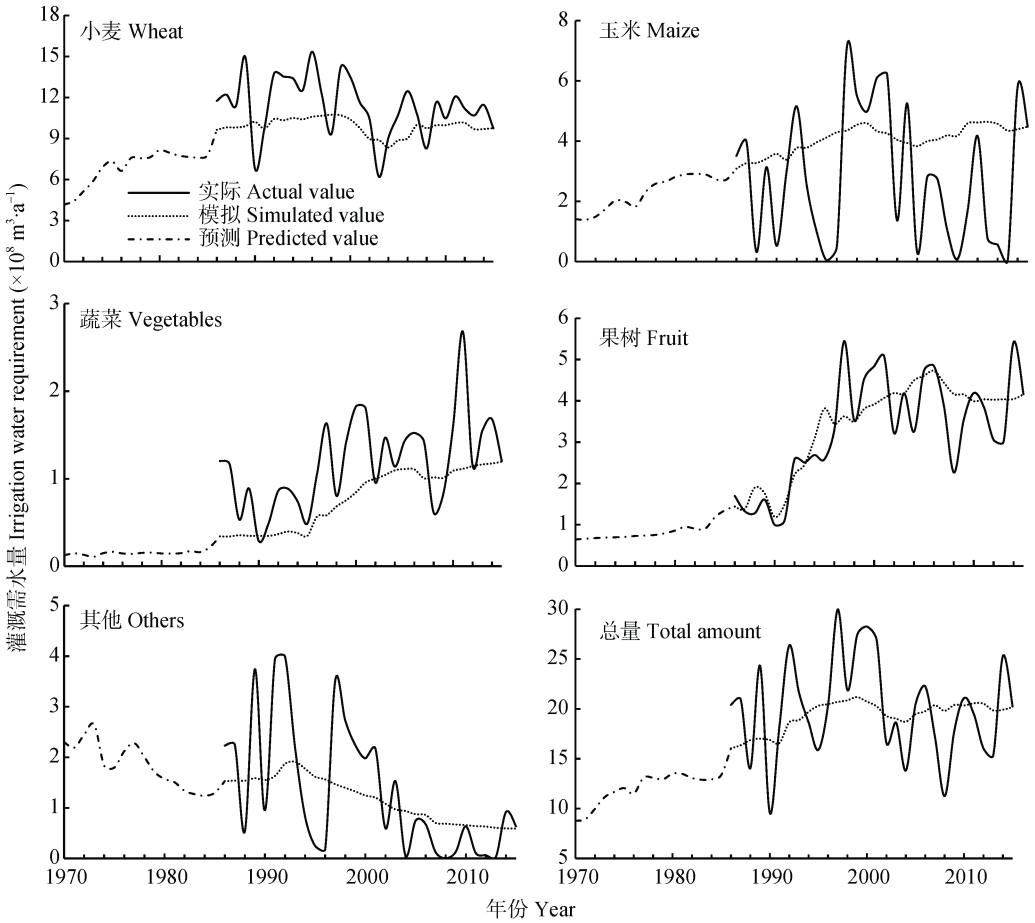

图 7　1970—2015 年研究区农作物消除降水年际波动的灌溉需水模拟值变化

Fig. 7　Changes of simulated irrigation water requirements of crops without fluctuation of annual precipitation in the study area from 1970 to 2015

结构和空间布局，对于实现雄安新区及其所在流域水资源长期保障具有重要作用。本文利用作物模型和蒸发皿法，估算了雄安新区上游 20 世纪 70 年代以来的农业灌溉需水量，重建其时空演化趋势。结果表明：农业灌溉需水量变化受降水年际波动强烈影响，以详细计算 1986—2015 年的需水量为例，1994—1996 年是丰水年，平均降水量达 699 mm，其需水深度较低，在 317.8~409.7 mm；而 1997—2001 年是枯水年，平均降水只有 393 mm，平均需水深度达 540.87 mm，而这 5 年也是保定市地下水水位下降最快的年份[32]。在消除降水年际波动的影响后，农业用水总体呈现增加的趋势，20 世纪 80 年代中期以后，上升趋势开始减缓，这是由于 70 年代后期到 80 年代初，是我国农业发展迅速的一个时间段，无论播种面积和有效灌溉都在增加，80 年代后，播种面积增加开始趋缓，耗水量较大的蔬菜、果树面积的增加，成为农业需水增长的主要原因。

由于 20 世纪 70 年代尤其 1985 年以前的农业数据并不完整，甚至缺乏，因此，关于 70 年代以来农业灌溉需水量的研究较少，而这个时期是中国农业发展的关键时期，农业对水资源变化的影响非常显著。本文利用县志中记载的播种面积、有效灌溉面积等数据恢复 20 世纪 70 年代以来在消除降水波动影响下的农业灌溉需水量，但这种方法也存在不足：首先，统计数据没有完全涉及每个县市，无法精确计算每个县的农业灌溉需水量，但本文重点讨论的是农业灌溉需水量变化趋势，数据的缺乏对趋势预测并没有太大影响；其次，由于 20 世纪 70 年代电力和生产力发展水平的限制，保证灌溉率不足，导致本研究推算的 70 年代灌溉需水量偏高，因此，20 世纪 70 年代农业灌溉需水量的增加趋势比文中计算结果更加显著，这在未来进一步评估农业用水时要注意。

山区径流减少导致了下游水资源的短缺，Tian 等[33]研究了海河流域 8 个子流域的径流变化趋势，发现径流减少的时间突变点与农田面积的增加高度吻合，由此证明人类农业生产活动是导致径流减少的根本原因。本研究计算了唐河上游唐县的农业灌溉需水量，发现在 20 世纪 80 年代之前唐县灌溉需

水量平均 0.19×10^8 m^3，进入 80 年代，由于播种面积迅速增加，需水量平均高达 0.33×10^8 m^3，即使是 2000 年之后，农业需水也仍呈增长趋势，这势必导致唐河径流的进一步减少。鉴于雄安新区上游山区灌溉需水总量仍呈上升趋势，未来山区来水减少的可能性更高，因此，有必要对雄安新区上游山区农业种植结构及耗水开展进一步研究。此外，雄安新区上游平原区地下水水位总体呈下降趋势，1980—2006 年地下水埋深下降幅度在 8~25 m[34]。根据统计资料，保定市由于农业用水而大量开采地下水，平均每年超采 7.94×10^8 m^3，其中雄安新区地下水亏缺严重，雄县已经累计超采 6.9×10^8 m^3。白洋淀作为雄安新区绿色发展的重要生态屏障，每年需要调度补水 2.55×10^8 m^3，再加上雄安新区建设也需要大量水资源，雄安新区供水安全将会面临巨大挑战。而农业用水严重制约了雄安新区以及上游水资源的可持续利用，因此，控制新区上游农业用水，种植低耗水作物、减少耗水作物的种植面积，成为恢复白洋淀和雄安新区清水产流的关键。

参考文献 References

[1] WALLACE J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 82(1/3): 105–119

[2] 李保国, 黄峰. 1998~2007 年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575–583
LI B G, HUANG F. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 575–583

[3] DING Y M, WANG W G, SONG R M, et al. Modeling spatial and temporal variability of the impact of climate change on rice irrigation water requirements in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 193: 89–101

[4] YANG Y H, TIAN F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River catchment, China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(3/4): 373–383

[5] FAN J, TIAN F, YANG Y H, et al. Quantifying the magnitude of the impact of climate change and human activity on runoff decline in Mian River Basin, China[J]. Water Science & Technology, 2010, 62(4): 783–791

[6] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1–10
ZHANG G H, FEI Y H, LIU C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 1–10

[7] GROGAN D S, ZHANG F, PRUSEVICH A, et al. Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 161–175

[8] XU Y Q, MO X G, CAI Y L, et al. Analysis on groundwater table drawdown by land use and the quest for sustainable water use in the Hebei Plain in China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 75(1): 38–53

[9] 周玮, 吕爱锋, 贾绍凤. 白洋淀流域 1959 年至 2008 年山区径流量变化规律及其动因分析[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1249–1255
ZHOU W, LYU A F, JIA S F. Trends and causes of runoff changes in mountainous areas of the Baiyangdian Lake Basin during the period 1959–2008[J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1249–1255

[10] 刘茂峰, 高彦春, 甘国靖. 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1438–1445
LIU M F, GAO Y C, GAN G J. Long-term trends in annual runoff and the impact of meteorological factors in the Baiyangdian Watershed[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1438–1445

[11] MOIWO J P, YANG Y H, LI H L, et al. Impact of water resource exploitation on the hydrology and water storage in Baiyangdian Lake[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(21): 3026–3039

[12] 张兆吉, 费宇红. 华北平原地下水可持续利用图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2009: 103–109
ZHANG Z J, FEI Y H. Atlas of Groundwater Sustainable Utilization in North China Plain[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2009: 103–109

[13] ALLEN R G, SMITH M, PEREIRA L S, et al. An update for the calculation of reference evapotranspiration[J]. ICID Bulletin, 1994, 43(2): 35–92

[14] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO, 1998: 89–102

[15] YANG Y H, WATANABE M, ZHANG X Y, et al. Estimation of groundwater use by crop production simulated by DSSAT-wheat and DSSAT-maize models in the piedmont region of the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(13): 2787–2802

[16] LIU H L, YANG J Y, DRURY C F, et al. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89(3): 313–328

[17] LI Z H, JIN X L, ZHAO C J, et al. Estimating wheat yield and quality by coupling the DSSAT-CERES model and proximal remote sensing[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 71: 53–62

[18] YANG Y M, YANG Y H, MOIWO J P, et al. Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 1711–1721

[19] 马林, 杨艳敏, 杨永辉, 等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 324–339
MA L, YANG Y M, YANG Y H, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2):

324–339

[20] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995
CHEN Y M, GUO G S, WANG G X, et al. Main Crop Water Requirement and Irrigation of China[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995

[21] 樊军, 王全九, 郝明德. 利用小蒸发皿观测资料确定参考作物蒸散量方法研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 14–17
FAN J, WANG Q J, HAO M D. Estimation of reference crop evapotranspiration by Chinese pan[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 14–17

[22] 黄兴法, 李光永, 王伟, 等. 充分微喷灌溉条件下苹果树耗水量的研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(4): 42–46
HUANG X F, LI G Y, WANG W, et al. Water use of micro-sprinkler irrigated apple trees under condition of full irrigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6(4): 42–46

[23] 黄兴法, 李光永, 王小伟, 等. 充分灌与调亏灌溉条件下苹果树微喷灌的耗水量研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 43–47
HUANG X F, LI G Y, WANG X W, et al. Water use of micro-sprinkler irrigated apple trees under full irrigation and regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 43–47

[24] 李光永, 王小伟, 黄兴法, 等. 充分灌与调亏灌溉条件下桃树滴灌的耗水量研究[J]. 水利学报, 2001, 32(9): 55–58
LI G Y, WANG X W, HUANG X F, et al. Study on water use of drip irrigated peach tree under the conditions of fully irrigated and regulated deficit irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(9): 55–58

[25] 李建明, 邹志荣, 付建峰. 温室番茄节水灌溉指标的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 110–112
LI J M, ZOU Z R, FU J F. Study on water-saving irrigation index for greenhouse tomato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(1): 110–112

[26] 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

[27] NAKAYAMA T, YANG Y H, WATANABE M, et al. Simulation of groundwater dynamics in the North China Plain by coupled hydrology and agricultural models[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(16): 3441–3466

[28] SUN J, MOONEY H, WU W B, et al. Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(21): 5415–5419

[29] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379–1389

[30] LIBISELLER C, GRIMVALL A. Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates[J]. Environmetrics, 2002, 13(1): 71–84

[31] ZHOU X Y, BAI Z J, YANG Y H. Linking trends in urban extreme rainfall to urban flooding in China[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(13): 4586–4593

[32] 吕晨旭, 贾绍凤, 季志恒. 近 30 年来白洋淀流域平原区地下水位动态变化及原因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 65–68
LYU C X, JIA S F, JI Z H. Dynamics and causes of groundwater table change in plain area of Baiyangdian Basin in last 30 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 65–68

[33] TIAN F, YANG Y H, HAN S M. Using runoff slope-break to determine dominate factors of runoff decline in Hutuo River Basin, North China[J]. Water Science and Technology, 2009, 60(8): 2135–2144

[34] ZHANG Y Q, WANG G W, WANG S Q, et al. Hydrochemical characteristics and geochemistry evolution of groundwater in the plain area of the Lake Baiyangdian watershed, North China Plain[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2018, 6(3): 220–233