

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.01086

近 20 年河北省几种高耗水作物的水分利用效率分析

史梦霞 张佳笑 石晓宇 褚庆全 陈 阜 雷永登*

中国农业大学农学院 / 农业农村部农作制度重点实验室, 北京 100193

摘 要: 近年来高耗水作物的大面积种植是导致河北省农业水资源日益短缺的重要原因之一。本文基于河北省 21 个国家标准气象站点 1999—2018 年气象数据和作物生育期相关数据, 采用 Penman-Monteith 公式和分段单值平均作物系数法, 计算了河北省冬小麦、夏玉米, 以及苹果、梨、西瓜、葡萄等几种高耗水作物的生育期需水量、有效降水量、灌溉需水量以及降水耦合度等指标; 从作物水分利用效率(WUE)、灌溉水分利用效率(WUEI)、营养水分利用效率(WUEN)、经济水分利用效率(WUEE)等角度, 全面分析了 6 种作物的水分利用时空演变特征。结果表明, 果树类作物的需水量总体大于粮食作物。作物灌溉需水量从大到小依次为苹果、梨、冬小麦、葡萄、西瓜、夏玉米。生育期内有效降水量最大的是苹果和梨, 最低的是冬小麦; 夏玉米的降水耦合度最高, 其次是西瓜; 除冬小麦外, 其他五种作物的降水耦合度在过去 20 年呈上升趋势。果树类作物的 WUE、WUEI、WUEE 均高于粮食作物, 尤其 WUEE 远高于粮食作物, 最高可达到粮食作物的十倍左右; 粮食作物的 WUEN 整体高于水果作物。本研究开展的作物水分利用效率综合分析, 可为河北省调整优化作物结构, 促进农业水资源的高效可持续利用提供参考。

关键词: 作物需水量; 有效降水量; 灌溉需水量; 水分利用效率

Water use efficiency of several water-intensive crops in Hebei province in recent 20 years

SHI Meng-Xia, ZHANG Jia-Xiao, SHI Xiao-Yu, CHU Qing-Quan, CHEN Fu, and LEI Yong-Deng*

College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University / Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China

Abstract: In recent years, the large-scale planting of water-intensive crops is one of the important reasons for the increasing shortage of agricultural water resources in Hebei province. Based on the meteorological data and crop growth period data of 21 national standard meteorological stations in Hebei province from 1999 to 2018, this study calculates the water demand, effective precipitation, irrigation water demand and precipitation coupling degree of winter wheat, summer maize, apple, pear, watermelon, grape and other water-intensive crops in Hebei province by Penman-Monteith formula and piecewise single value average crop coefficient method. The spatial and temporal variations of crop water use in Hebei province were comprehensively analyzed from the perspectives of water use efficiency (WUE), irrigation water use efficiency (WUEI), nutrient water use efficiency (WUEN), and economic water use efficiency (WUEE). The results revealed that the water requirement of fruit crops was higher than that of grain crops. The water requirement for crop irrigation from large to small was apple, pear, winter wheat, grape, watermelon, and summer maize. During the growth period, the largest effective precipitation was apple and pear, and the lowest was winter wheat; the precipitation coupling degree of summer maize was the highest, followed by watermelon; the precipitation coupling degree of all crops indicated an upward trend in the past 20 years except for winter wheat. The WUE, WUEI, and WUEE of fruit crops were higher than those of grain crops, particularly, WUEE of fruit crops was 10 times higher than that of grain crops. In contrast, the WUEN of grain crops was higher than that of fruit crops. The comprehensive analysis of various crop water use efficiency provides valuable insights for optimizing cropping systems and achieving agricultural water sustainability in Hebei province.

本研究由国家自然科学基金项目(31801315, 72061147001), 国家重点研发计划项目(2016YFD0300201)和国家社科基金重大项目(18ZDA074)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31801315, 72061147001), the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300201), and the Major Projects of the National Social Science Foundation of China (18ZDA074).

* 通信作者(Corresponding author): 雷永登, E-mail: leiyd@cau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: mx549678854@163.com

Received (收稿日期): 2020-11-16; Accepted (接受日期): 2021-04-14; Published online (网络出版日期): 2021-06-08.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.s.20210607.1713.002.html>

Keywords: crop water requirement; effective precipitation; irrigation water demand; water use efficiency

河北省是我国的农业大省之一, 长期以来过度的农业灌溉用水导致了其地下水位显著下降^[1]。据统计, 河北省农业用水在总用水量中的占比高达 72.4%, 地下水超采严重^[2]。特别近年来一些高耗水的粮食作物和水果蔬菜等大面积种植, 使得地区农业用水日益短缺^[3]。河北省是以种植冬小麦、夏玉米为主的粮食主产区, 国家统计局数据表明, 1999—2018 年间, 二者总种植面积占河北省粮食作物的 80% 以上; 其中夏玉米、冬小麦近 20 年平均种植面积依次为 $3.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $2.43 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 分别占河北省粮食作物总种植面积的 47% 和 37%。此外, 苹果、梨、葡萄、西瓜等水果的种植面积占河北省水果总种植面积的 50% 以上。在气候变化和区域水资源日益紧缺的严峻形势下, 如何提高农业灌溉用水的生产效率和经济效益, 对河北省农业可持续发展有十分重要的现实意义。

在区域有限的水资源限制下, 充分利用自然降水, 以及提高作物的水分利用效率, 成为解决地区水资源矛盾的重要途径^[4-5]。目前国内对于作物需水量与作物系数的研究主要集中在大田作物与经济作物上^[6], 例如, 崔秋利^[7]基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式(P-M 公式)估算了 1957—2017 年京津冀地区冬小麦、夏玉米的耗水量及水分利用效率, 结果表明冬小麦、夏玉米的水分利用效率仍有 20%~30% 的提升空间。也有研究采用 SIMETAW 模型, 估算了北京地区主要作物的需水量, 结果表明, 果树类作物需水量>粮经作物>蔬菜类作物^[8]。段爱旺等^[9]对 1980—1988 年我国主要粮食作物的水分利用效率进行了分析计算, 张瑞庆等^[10]对北京上庄农田不同种植模式下的作物产量和水分利用效率进行了评价。然而, 以往研究多关注作物产量的水分利用效率, 关于作物的营养水分利用效率以及经济水分利用效率等方面的量化评估还比较欠缺。因此, 有必要从灌溉水分利用效率、经济营养水分利用效率等多个角度对作物的水分利用效率开展综合评价, 有助于河北省根据不同的目标需求来合理调整优化作物种植结构, 实现农业节水和社会经济的协调发展。

鉴于河北省水资源短缺现状以及过去 20 年的水果与作物种植变化情况, 本研究基于河北省 21 个国家标准气象站点的 1999—2018 年气象数据, 采用 FAO 推荐的 P-M 公式和分段单值平均作物系数法,

对河北省种植面积较大的冬小麦、夏玉米、苹果、梨、西瓜、葡萄等 6 种主要高耗水作物生育期的需水量、有效降水量、灌溉需水量、降水耦合度以及水分利用效率、灌溉水分利用效率、经济水分利用效率和营养水分利用效率等开展全面评估。研究结果可为河北省以及华北地区合理调整种植结构和优化作物生产布局提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北省地处华北平原, 包括石家庄、唐山、秦皇岛、保定、沧州等 11 个地市, 面积约 18.9 万平方千米, 水资源匮乏, 降水量时空分布不均。由于供水不能满足农业用水总量的需求, 河北省农业灌溉用水多来自地下水。据统计, 河北省地下水年均超采量高达 50 亿立方米, 超采率高达 23%^[2], 农业水资源短缺形势十分严峻。因此选择河北省开展作物需水量和水分利用效率研究, 有很好的典型性和迫切性。

1.2 数据来源

本研究使用的气象数据来自河北省 21 个国家标准气象站点 1999—2018 年的逐日气象资料, 包括日最高气温、最低气温、平均气温、降水量、日照时数、风速和相对湿度等。作物系数和生育期数据来自 FAO-56, 并结合区域的气象条件进行了校正。作物价格数据来自 EPS 数据平台的世界农林数据库; 100 g 作物鲜质量中某营养素含量来自于《中国食物成分表(2002)》。作物产量数据来自国家统计局和河北省农业统计年鉴。

运用 ArcGIS 10.5 软件的反距离权重法进行空间插值分析, 采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 25 软件进行数据统计分析。

1.3 研究方法

1.3.1 参考作物蒸散量 本研究采用 FAO 推荐的 P-M 公式^[11]计算参考作物蒸散量:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

式中, R_n 为地表净辐射, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; T_{mean} 为日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; U_2 为 2 m 高处风速, 单位为 m s^{-1} ; e_s 为饱和水汽压, 单位为 kPa ; e_a

为实际水气压, 单位为 kPa; Δ 为饱和水气压曲线斜率, 单位为 $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; γ 为干湿表常数, 单位为 $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

1.3.2 有效降水量 有效降水量计算公式如下^[12]。

$$P_{e,j} = a_j \times P_j \quad (2)$$

式中, $P_{e,j}$ 表示某日的有效降水量, 单位为 mm; P_j 表示某日的降水量, 单位为 mm; a_j 表示降水量的有效利用系数, a_j 的取值与 P_j 有关: $P_j \leq 5 \text{ mm}$ 时, $a_j = 1$; $5 \text{ mm} < P_j \leq 50 \text{ mm}$ 时, $a_j = 0.9$; $P_j > 50 \text{ mm}$ 时, $a_j = 0.75$ ^[13]。

某时期的有效降水量等于该时期内所有日的有效降水量之和:

$$P_{e,i} = \sum_{j=1}^n P_{e,j,i} \quad (3)$$

式中, $P_{e,i}$ 表示某时期的有效降水量, 单位为 mm, j (1, 2, ..., n) 表示该时期内的日序列, $P_{e,j,i}$ 为 i 时期的第 j 日的有效降水量, 单位为 mm。整个生育期的有效降水量 P_e 是全生育期有效降水量的和:

$$P_e = P_{e,i} \quad (4)$$

1.3.3 作物系数 运用 FAO-56 推荐的分段单值平均法, 并结合区域气象条件, 对作物系数进行校正^[11]。

$K_c = K_{c(\text{tap})} + [0.04 (U_2 - 2) - 0.004 (\text{RH}_{\min} - 45)] (h/3)^{0.3}$ (5)
式中, $K_{c(\text{tap})}$ 为不同生长阶段在标准条件下的作物系数, U_2 表示 2 m 高度处的风速, $\text{RH}_{\min}$ 为该生育阶段的日最低相对湿度的平均值, h 是该生育阶段内作物的平均高度, 单位为 m。

1.3.4 作物需水量 作物需水量为参考作物蒸散量与对应作物系数的乘积^[11]。

$$\text{ET}_{c,j} = K_{c,j} \times \text{ET}_{0,j} \quad (6)$$

式中, $\text{ET}_{c,j}$ 某日的作物需水量; $K_{c,j}$ 某日对应的作物系数; $\text{ET}_{0,j}$ 某日作物参考蒸散量, 由式(1)计算所得。

1.3.5 灌溉需水量 某时期的灌溉需水量与该时期的作物需水量和有效降水量有关, 作物灌溉需水量等于有效降水量与作物需水量的差值^[14]。

$$\text{ET}_{\text{aw},i} = \begin{cases} \text{ET}_{c,i} - P_{e,i} & \text{ET}_{c,i} \geq P_{e,i} \\ 0 & \text{ET}_{c,i} < P_{e,i} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\text{ET}_{\text{aw},i}$ 为 i 时期的灌溉需水量, $\text{ET}_{c,i}$ 为 i 时期的作物需水量, $P_{e,i}$ 为 i 时期的有效降水量。作物全生育期内的灌溉需水量 ET_{aw} 为所有时期的灌溉需水量之和:

$$\text{ET}_{\text{aw}} = \sum_i \text{ET}_{\text{aw},i} \quad (8)$$

1.3.6 降水耦合度 作物需水量与自然降水的耦

合度, 反映作物对自然降水的利用程度, 数值上介于 0~1 之间^[12]。

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & P_i \geq \text{ET}_{c,i} \\ P_i / \text{ET}_{c,i} & P_i < \text{ET}_{c,i} \end{cases} \quad (9)$$

式中, λ_i 表示第 i 阶段作物需水与自然降水的耦合度; P_i 表示第 i 阶段内自然降水量, mm; $\text{ET}_{c,i}$ 表示第 i 阶段内作物需水量, 单位为 mm。

1.3.7 作物水分利用效率 作物水分利用效率是衡量作物产量与用水量关系的一种指标, 也是评价水分亏缺下植物生长适宜度的综合指标之一^[16], 作物水分利用效率通常表示为产量与耗水量的比值^[17]。

$$\text{WUE} = Y / \text{ET}_c \quad (10)$$

式中, WUE 为水分利用效率, 单位为 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; Y 为作物产量, kg hm^{-2} ; ET_c 为作物需水量, 单位为 mm。

1.3.8 灌溉水分利用效率

$$\text{WUEI} = Y / I \quad (11)$$

式中, WUEI 是灌溉水分利用效率, 单位为 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; Y 为作物产量, 单位为 kg hm^{-2} ; I 为总灌溉量, 单位为 mm^[18]。

1.3.9 营养水分利用效率

$$\text{WUEN} = \text{YN} / \text{ET}_c \quad (12)$$

式中, WUEN 是营养水分利用效率, $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; YN 为作物营养当量产量, 单位为 kg hm^{-2} ; 其中, $\text{YN} = \text{目标作物营养当量} / \text{基准作物营养当量} \times \text{目标作物产量 } Y$; 作物营养当量 = $\sum \text{作物营养元素密度} / n$, 其中 $n=20$, 具体参考李俊颖等^[19]基于作物营养当量修正产量比系数法的计算方法; 作物营养元素密度 = $100 \text{ g 食物鲜质量中某营养元素含量} / \text{该营养元素参考摄入量标准}$, $100 \text{ g 作物中营养元素含量及各营养元素日均参考摄入量}$ 来自于《中国食物成分表(2002)》。本文研究的几种作物中苹果的生育期需水量最高, 因此以苹果为基准作物进行折算。

1.3.10 经济水分利用效率

$$\text{WUEE} = \text{YE} / \text{ET}_c \quad (13)$$

式中, WUEE 是经济水分利用效率, 单位为 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; YE 为经济当量产量, 单位为 kg hm^{-2} ; $\text{YE} = \text{目标作物市场价格} / \text{基准作物价格} \times \text{目标作物产量 } Y$ 。

2 结果与分析

2.1 6 种作物的生育期与逐月 K_c 值

采用 FAO-56^[11]推荐的分段单值平均法计算作物系数(K_c), 将作物的生育期划分为初始生长期、快速发育期、中期和后期, 然后结合区域气象条件对

K_c 值进行了校正(详见公式 5)。表 1 为校正后的河北省 6 种作物近 20 年平均的逐月 K_c 值。从作物全生育期 K_c 值来看, 从大到小依次为: 夏玉米、苹果和梨、西瓜、葡萄、冬小麦。

2.2 6 种作物生育期内需水量、有效降水量以及灌溉需水量的时空分布

图 1 是河北地区 6 种主要作物近 20 年的作物需水量、有效降水量以及灌溉需水量变化曲线。由图

1(a)~(d)可知, 几种水果作物中, 苹果和梨的年均需水量在 700 mm 左右, 有效降水量远不能满足需水量, 生育期内需要补充大量灌溉水。

葡萄的年均需水量在 600 mm 左右, 生育期内有效降水量呈显著上升趋势($P<0.01$); 西瓜的年均需水量平均为 400 mm, 相较于其他 3 种水果, 西瓜的年均需水量较少。由图 1-(e)~(f)可知, 冬小麦的需水量历年变化量在 350~470 mm 之间, 有效降水量在

表 1 6 种作物的生育期与逐月 K_c 值
Table 1 Growth periods and monthly K_c values of six crops

作物种类 Crop species	生育期 Growth period (month/day)	逐月 K_c 值 Monthly K_c values												全育期 Whole growth period
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
冬小麦 Winter wheat	10/5–6/9	0.40	0.51	0.76	1.03	1.10	0.49				0.40	0.40	0.40	0.62
夏玉米 Summer maize	6/12–9/21						0.40	0.81	1.16	0.88				0.85
苹果 Apple	3/1–10/31			0.45	0.59	0.86	0.91	0.91	0.91	0.91	0.78			0.79
梨 Pear	3/1–10/31			0.45	0.59	0.86	0.91	0.91	0.91	0.91	0.78			0.79
葡萄 Grape	3/1–9/25			0.32	0.57	0.81	0.82	0.82	0.68	0.50				0.65
西瓜 Watermelon	4/1–7/20				0.44	0.87	0.97	0.82						0.77

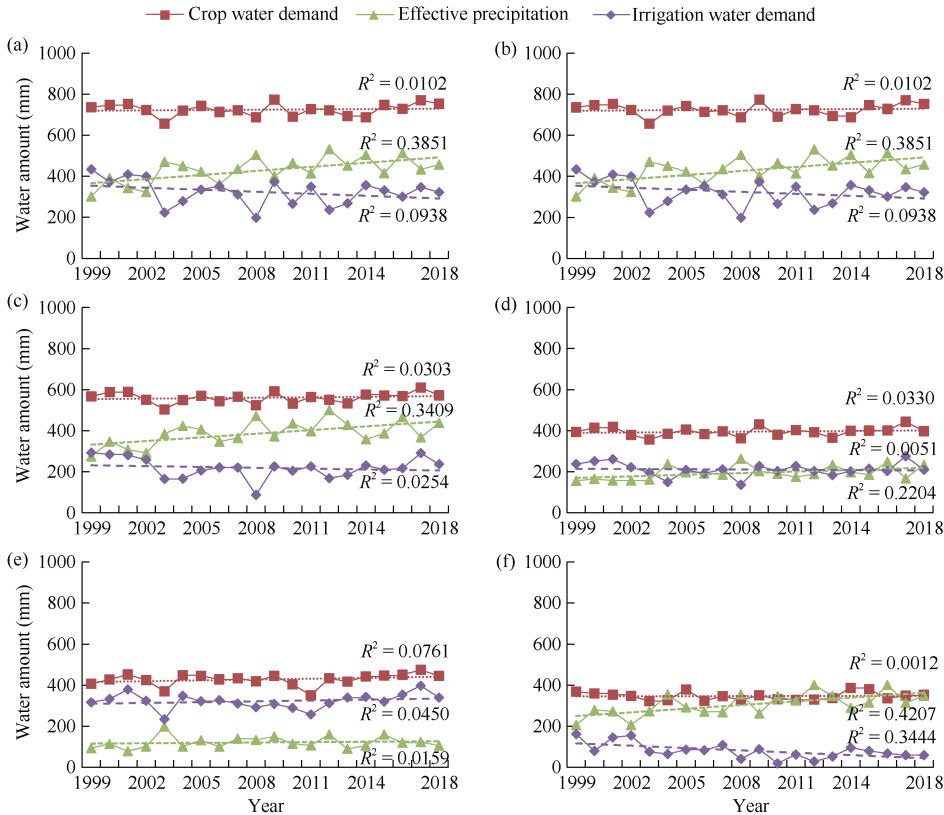


图 1 1999–2018 年河北省 6 种作物需水量、有效降水量以及灌溉需水量年际间变化
Fig. 1 Water demand, effective precipitation, and irrigation water demand of six crops in Hebei province from 1999 to 2018
(a)~(f), 分别为苹果、梨、葡萄、西瓜、冬小麦、夏玉米。
(a)–(f) represent apple, pear, grape, watermelon, winter wheat, and summer maize, respectively.

100 mm 左右, 2003 年的有效降水量最大, 高达 200 mm, 2001 年有效降水最少, 仅有 79 mm, 相应的, 2003 年的灌溉需水量最小, 2001 年灌溉需水量最大。夏玉米的需水量低于冬小麦, 历年大都在 300 mm 左右, 有效降水量在 200~400 mm 之间, 1999—2018 年间生育期内有效降水量呈现显著上升趋势 ($P<0.01$), 灌溉需水量呈显著下降趋势 ($P<0.01$)。

对比不同作物类型, 水果作物的作物需水量整体高于粮食作物; 冬小麦的生育期内有效降水量最小, 西瓜次之; 灌溉需水量从大到小依次为: 苹果和梨、冬小麦、葡萄、西瓜、夏玉米。从需水量的变化趋势来看, 1999—2018 年间, 6 种作物生育期内有效降水量均呈上升趋势, 除冬小麦外的其他作物的灌溉需水量均呈下降趋势。

图 2 是河北省 6 种作物近 20 年生育期内作物需水量、有效降水量以及灌溉需水量的空间分布情况。由图可知, 不同作物的作物需水量、有效降水量以及灌溉需水量等指标在空间上均呈现出不同的分布规律。几种作物的作物需水量空间分布均呈现出南部高于北部、西部高于东部的分布规律; 有效降水量东北部较高, 中部较低; 灌溉需水量呈现出东南部较高, 东北部较低分布规律。

2.3 6 种作物生育期内降水耦合度年际间变化特征

图 3 反映了近 20 年河北省 6 种作物生育期内降水耦合度变化趋势。从图中可以看出, 不同作物的需水与降水的耦合度存在一定差异, 综合 6 种作物的降水耦合度, 由高到低排序为夏玉米>葡萄>苹果和梨>西瓜>冬小麦。1999—2018 年间, 河北省夏玉米降水耦合度呈显著上升趋势 ($P<0.05$) (图 3-e)。

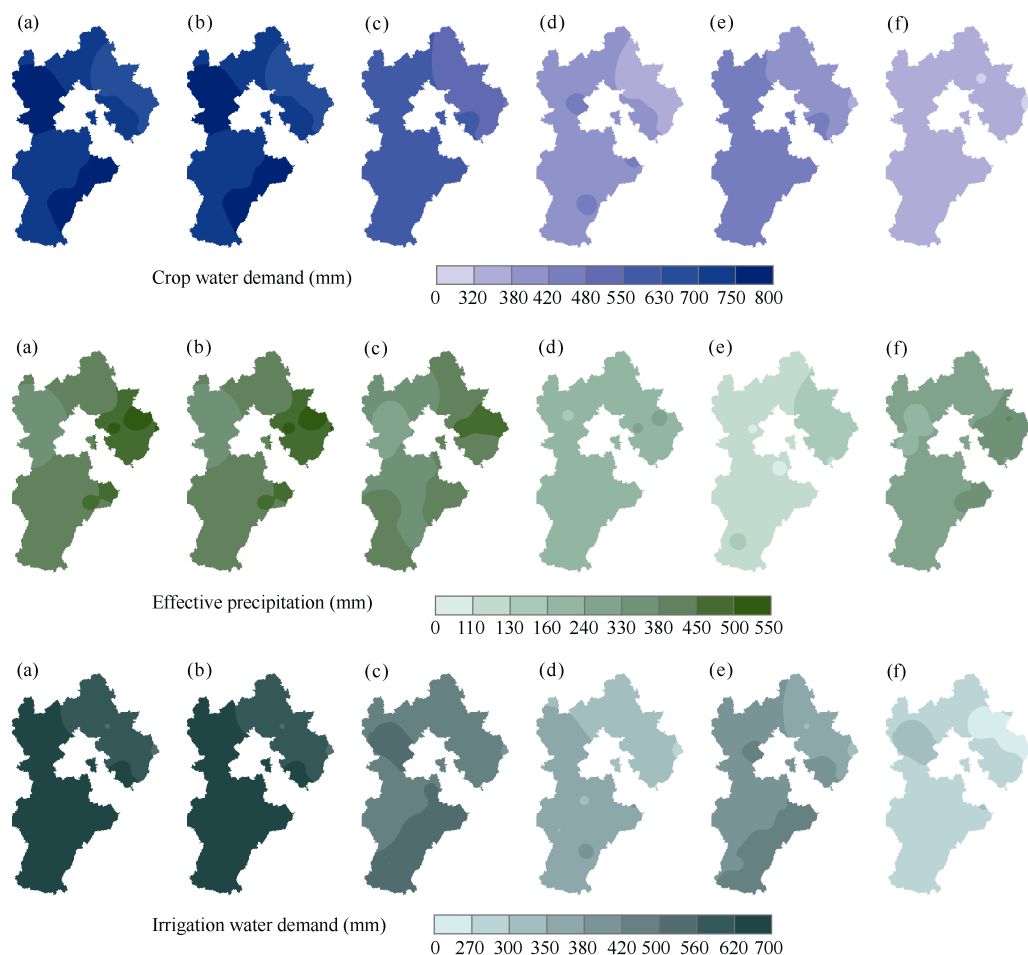


图 2 1999—2018 年河北省 6 种作物需水量、有效降水量以及灌溉需水量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water demand, effective precipitation, and irrigation water demand of six crops in Hebei province from 1999 to 2018

(a)~(f), 分别为苹果、梨、葡萄、西瓜、冬小麦、夏玉米。

(a)~(f) represent apple, pear, grape, watermelon, winter wheat, and summer maize, respectively.

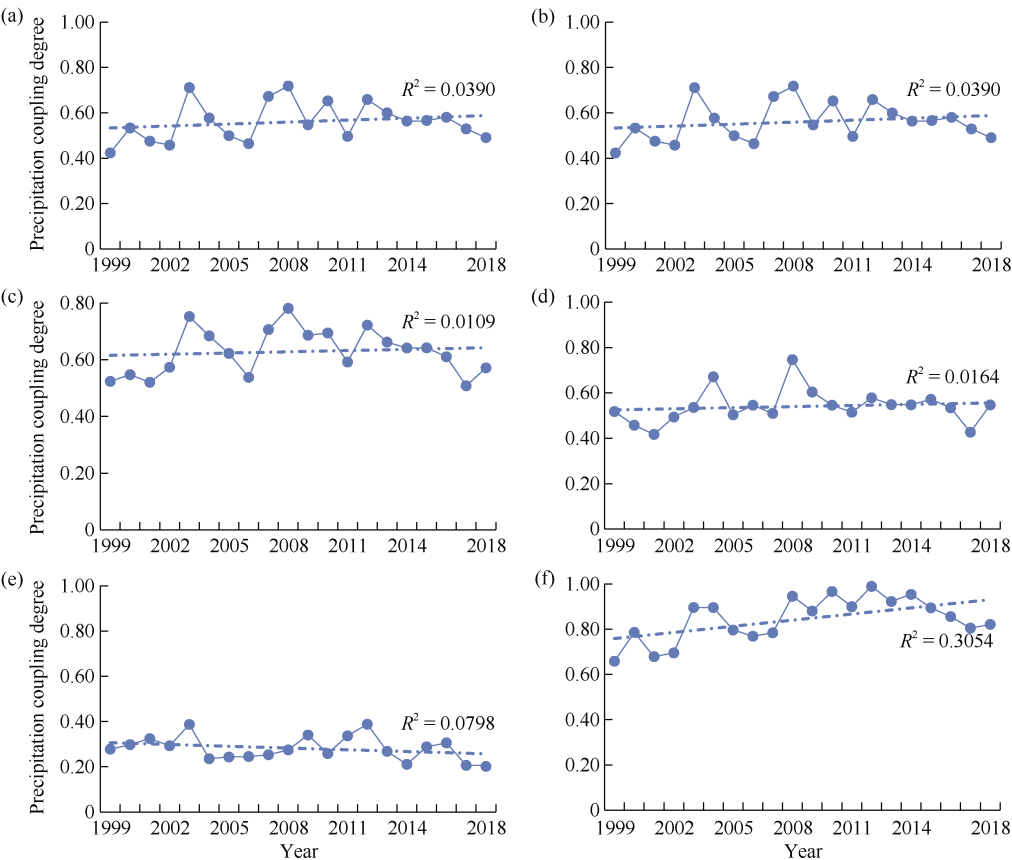


图 3 1999–2018 年河北省 6 种作物生育期内降水耦合度年际间变化
Fig. 3 Interannual variation of precipitation coupling degree during growth period of six crops in Hebei province from 1999 to 2018
(a)~(f), 分别为苹果、梨、葡萄、西瓜、冬小麦、夏玉米。
(a)–(f) represent apple, pear, grape, watermelon, winter wheat, and summer maize, respectively.

2.4 河北省 6 种作物的区域总灌溉需水量变化

图 4 反映了近 20 年河北省 6 种作物的区域总灌溉需水量情况。区域总灌溉需水量是考虑整个河北省作物种植面积之后的某种作物的总灌溉需水量。河北省这 6 种作物总灌溉需水量在 20 年间不断变化, 总灌溉需水量之和在 2003 年之前整体较高, 2003

年达到 20 年间最低值。几种作物的区域总灌溉需水量从大到小依次为: 冬小麦、夏玉米、苹果、梨、西瓜、葡萄, 且冬小麦的总灌溉需水量远高于其他作物。

2.5 6 种作物生育期内水分利用效率分析

由表 2 可知, 6 种作物 20 年的平均作物水分利用效率(WUE)、灌溉水分利用效率(WUEI)、营养水分利用效率(WUEN)、经济水分利用效率(WUEE)存在较大差异。WUE 从大到小依次为: 葡萄>西瓜>梨>苹果>夏玉米>冬小麦; WUEI 从大到小依次为: 葡萄>西瓜>夏玉米>梨>苹果>冬小麦; WUEN 从大到小依次为: 葡萄>冬小麦>夏玉米>梨>西瓜>苹果; WUEE 从大到小为: 葡萄>西瓜>苹果>梨>冬小麦>夏玉米。

综合来看, 葡萄的各种水分利用效率在 6 种作物中都居于首位。对比不同作物类型, 粮食作物的 WUEN 整体高于水果作物, 而 WUE、WUEI、WUEE 整体低于水果作物。

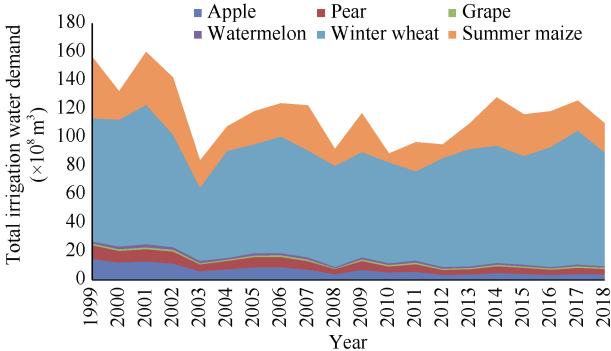


图 4 1999–2018 年河北省 6 种作物的区域总灌溉需水量变化
Fig. 4 Variation of regional total irrigation water demand of six crops in Hebei province from 1999 to 2018

表 2 6 种作物的 20 年平均水分利用效率

Table 2 Average water use efficiency of six crops for 20 years

作物种类 Crop species	作物水分利用效率 WUE	灌溉水分利用率 WUEI	营养水分利用率 WUEN	经济水分利用率 WUEE
苹果 Apple	16.22	38.36	16.22	16.22
梨 Pear	18.12	42.65	52.24	16.15
西瓜 Watermelon	31.89	87.80	42.52	44.64
葡萄 Grape	126.94	244.37	126.94	53.32
冬小麦 Winter wheat	12.29	16.44	97.68	5.59
夏玉米 Summer maize	14.36	83.06	80.65	5.41

WUEN、WUEE 均以苹果为基准物进行计算。

WUEN and WUEE are calculated based on data of apple. WUE: water use efficiency; WUEI: irrigation water use efficiency; WUEN: nutrient water use efficiency; WUEE: economic water use efficiency.

图 5 反映了近 20 年河北省 6 种作物每五年平均的 WUE、WUEI、WUEN、WUEE 的年间变化, 各种作物的 WUE、WUEN、WUEE 在 20 年间呈不断上升趋势, 仅葡萄和夏玉米的 WUEI 在不同年间有所降低。4 种水分利用效率对比来看, 20 年间 WUEE 的增长幅度最大, 主要在 2009 年后大幅增长, WUEI 在 2014 年后有所下降。

3 讨论

本研究结果表明, 水果类作物的需水量整体高于粮食作物, 需水量从大到小依次是苹果和梨、葡萄、冬小麦、西瓜、夏玉米, 这与现有文献中研究结果基本吻合。例如, 周立华等^[20]研究了银北主要农作物、蔬菜、牧草、树木的需水规律, 结果表明苹果与梨生育期需水量接近, 且水果类作物明显高于其他粮食类作物。孔箫铎等^[8]采用 SIMETAW 模

型, 估算了北京地区主要作物的需水量, 结果表明, 生育期内需水量从大到小依次为葡萄、苹果、冬小麦、西瓜、夏玉米。在作物水分利用效率计算方面, 崔秋利等^[7]的研究表明夏玉米水分利用效率高于冬小麦, 即消耗相同体积的水, 夏玉米能够获得更高的产量, 这与本文的计算结果是一致的。由于目前针对水果类作物水分利用效率的研究较少, 本文主要参考了王会肖等^[21]采用的基于产量的作物水分利用效率计算方法, 暂未考虑水果与粮食作物的果实或籽粒含水量的差异及其对水分利用效率的影响。今后如果条件具备, 可以考虑基于不同水果和粮食作物的含水量实验室测定, 对作物水分利用效率做进一步的深入分析。

由于研究的时间尺度和作物生育期划分等方面的不同, 本研究中某些作物的需水量与其他文献中计算的也存在一定差异。水果作物中西瓜的需水量

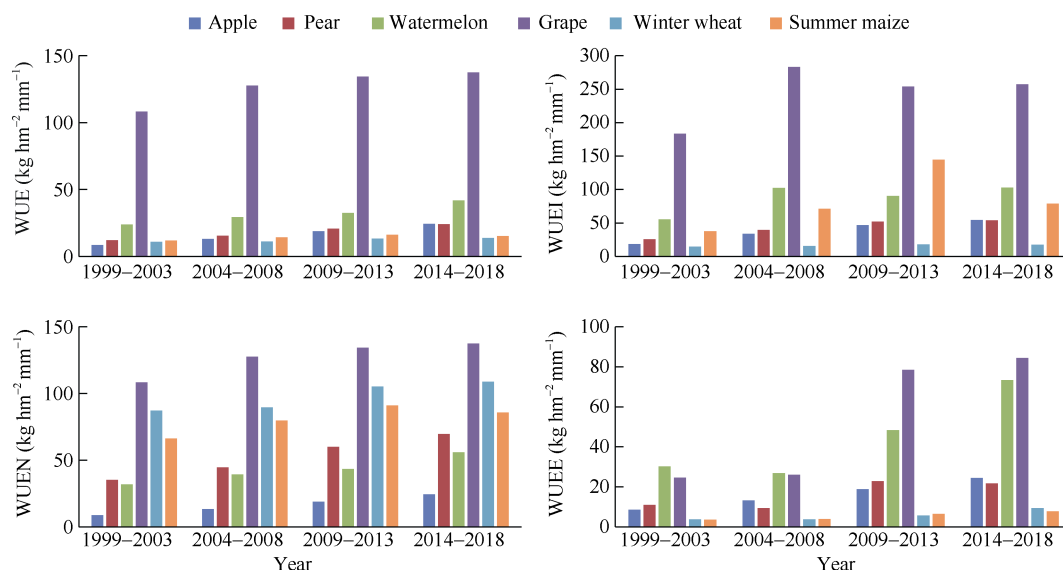


图 5 1999–2018 年河北省 6 种作物不同水分利用效率的年间变化

Fig. 5 Interannual variation of water use efficiency of six crops in Hebei province from 1999 to 2018

较小, 主要因为西瓜的生育期相比于其他几种水果较短。葡萄的水分利用效率在几种作物中最高, 主要由于其单产较高, 据统计, 近 20 年河北省葡萄的平均单产是苹果的 1.5 倍, 梨的 2.6 倍, 冬小麦和夏玉米的 3.5 倍左右。本研究重点分析了河北省几种典型高耗水作物的水分利用特征, 今后可以考虑更多的作物种类, 从而为河北地区调整优化作物布局提供更为全面可靠的依据。

本研究在计算作物需水量的基础上, 对河北省主要作物近 20 年的降水耦合度和水分利用效率进行了全面评估, 研究结果对于河北省根据不同的目标需求调整优化作物种植结构有一定参考价值。其中, 降水耦合度反映了作物对自然降水的利用程度, 对区域作物合理利用降水资源, 减少灌溉用水量有重要意义。水资源是限制河北省农业发展的重要因素, 在考虑作物结构和布局调整时, 可以优先选择降水耦合度相对较高的作物, 最大程度减少灌溉水资源的消耗。从近 20 年 6 种作物的降水耦合度来看, 夏玉米的降水耦合度最高, 其次为葡萄和西瓜, 因此适当扩大夏玉米种植面积是可行的。除此之外, 葡萄和西瓜的几种水分利用效率都比较高, 且经济水分利用效率远远高于粮食作物, 因此进行作物种植优化调整时, 在保证冬小麦、夏玉米种植面积和粮食安全的前提下, 适当扩大葡萄、西瓜的种植, 有助于增加农业经济收入。

4 结论

本研究中的粮食作物的需水量和灌溉需水量整体低于水果作物。冬小麦生育期内有效降水远不能满足冬小麦生长的水分需求, 灌溉需水量最大。而夏玉米生育期内有效降水和需水量的耦合度较高, 灌溉需水量较少。水果作物的生育期内需水量与灌溉需水量从大到小为苹果和梨、葡萄、西瓜。水分利用效率方面, 粮食作物的 WUEN 高于水果作物, 而水果作物的 WUE、WUEI、WUEE 均高于粮食作物, 尤其 WUEE 远高于粮食作物, 最高可达到粮食作物的 10 倍左右, 1999—2018 这 20 年间, 河北省 6 种作物的 WUE、WUEN、WUEE 均呈现不断增长的趋势。在我国粮食主产区水资源短缺和保障粮食安全的双重压力下, 提高作物的综合水分利用效率, 对于区域农业可持续发展有重要意义。

References

[1] 谢花林, 程玲娟. 地下水漏斗区农户冬小麦休耕意愿的影响

因素及其生态补偿标准研究——以河北衡水为例. 自然资源学报, 2017, 32: 2012–2022.

Xie H L, Cheng L J. Influence factors and ecological compensation standard of winter wheat-fallow in the groundwater funnel area. *J Nat Res*, 2017, 32: 2012–2022 (in Chinese with English abstract).

[2] 曹永强, 朱明明, 李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征. 生态学报, 2018, 38: 560–570.

Cao Y Q, Zhu M M, Li W J. Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei province over 60 years. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 560–570 (in Chinese with English abstract).

[3] 孟建, 姚旭擎, 杨晓琳, 罗建美, 沈彦俊. 地下水超采区农业种植结构与作物耗水时空演变研究. 农业机械学报, 2020, 51: 302–312.

Meng J, Yao X Q, Yang X L, Luo J M, Shen Y J. Spatial and temporal evolution of agricultural planting structure and crop water consumption in groundwater overdraft area. *Trans CSAM*, 2020, 51(11): 302–312 (in Chinese with English abstract).

[4] 辛琪, 林少喆, 王妮娜, 荣旭, 李宗毅, 王春堂. 间隔交替波涌灌溉对冬小麦土壤水分与水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 21–25.

Xin Q, Lin S Z, Wang N N, Rong X, Li Z Y, Wang C T. Effect of alternate surge flow irrigation on soil moisture and water use efficiency of winter wheat field. *J Irrig Drain*, 2019, 38(1): 21–25 (in Chinese with English abstract).

[5] 范田亿, 张翔. 2000–2014 年中国粮食主产区植被水分利用效率时空演变特征研究. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 99–107.

Fan T Y, Zhang X. Spatiotemporal variation of water use efficiency of crops in main agricultural production regions of China from 2000 to 2014. *J Irrig Drain*, 2019, 38(3): 99–107 (in Chinese).

[6] 齐述华, 李子忠, 龚元石. 应用农田水量平衡原理计算三种蔬菜的需水量和作物系数. 中国农业大学学报, 2002, 7(1): 71–76.

Qi S H, Li Z Z, Gong Y S. Evaluating crop water requirements and crop coefficients for three vegetables based on field water budget. *J China Agric Univ*, 2002, 7(1): 71–76 (in Chinese with English abstract).

[7] 崔秋利. 1957–2017 年京津冀主要作物水分利用效率及节水潜力分析. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 93–98.

Cui Q L. Analysis of WUE for main crops and water-saving potential in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 1957–2015. *J Irrig Drain*, 2020, 39(2): 93–98 (in Chinese with English abstract).

[8] 孔箫铤, 张海林, 陈阜, 宋振伟. 基于 SIMETAW 模型的北京地区主要作物需水量估算. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 109–115.

Kong Q X, Zhang H L, Chen F, Song Z W. Estimation of main crop water requirement in Beijing based on SIMETAW model. *J China Agric Univ*, 2009, 14(5): 109–115 (in Chinese with English abstract).

[9] 段爱旺, 张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究. 农业工程学报, 2000, 16(4): 41–44.

Duan A W, Zhang J Y. Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China. *Trans CSAE*, 2000, 16(4): 41–44 (in Chinese).

[10] 张瑞庆, 龚元石. 北京上庄镇农田不同种植模式下作物产量

- 和水分利用效率评价. 灌溉排水学报, 2017, 36(增刊 2): 104–109.
- Zhang R Q, Gong Y S. Evaluation of crop yield and water use efficiency under different planting patterns in Shangzhuang town of Beijing. *J Irrig Drain*, 2017, 36(S2): 104–109 (in Chinese).
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: United Nations Food and Agri-culture Organization, 1998. pp 17–28.
- [12] 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 刘祖贵. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展. 灌溉排水学报, 2007, 26(3): 27–30.
- Liu Z D, Duan A W, Xiao J F, Liu Z G. Research progress on calculation methods of effective rainfall in growth period on dry crop. *J Irrig Drain*, 2007, 26(3): 27–30 (in Chinese).
- [13] 高晓容, 王春乙, 张继权, 薛绪掌. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及旱涝时空变化. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101–109.
- Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q, Xue X Z. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years. *Trans CSAE*, 2012, 28(12): 101–109 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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.
- Liu Y, Wang L, Ni G H, Cong Z T. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China. *Trans CSAE*, 2009, 25(12): 6–12 (in Chinese with English abstract).
- [15] 商蒙非, 杨萌, 冯宇鹏, 贾浩, 李硕, 宋英杰, 陈阜, 褚庆全. 近 35 年吴桥县夏玉米水分亏缺变化趋势分析. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 1–10.
- Shang M F, Yang M, Feng Y P, Jia H, Li S, Song Y J, Chen F, Chu Q Q. Study on the water deficit trend of summer maize in recent 35 years in Wuqiao county, Hebei province. *J China Agric Univ*, 2018, 23(9): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- [16] 吕明洋, 王俊, 胡宁, 隋标, 王鸿斌, 赵兴敏, 赵兰坡. 吉林玉米带不同玉米//小麦间作模式对作物产量及水分利用率的影响. 玉米科学, 2019, 27(2): 106–112.
- Lyu M X, Wang J, Hu N, Sui B, Wang H B, Zhao X M, Zhao L P. Effects of different maize//wheat intercropping systems on crop yield and water use efficiency in Jilin Maize Belt. *J Maize Sci*, 2019, 27(2): 106–112 (in Chinese with English abstract).
- [17] Hussain G, Al-Jaloud A A, Al-Shammery S F, Karimulla S. Effect of saline irrigation on the biomass yield, and the protein, nitrogen, phosphorus, and potassium composition of alfalfa in a pot experiment. *J Plant Nutr*, 1995, 18: 2389–2408.
- [18] 马灵玲, 占车生, 唐伶俐, 姜小光. 作物需水量研究进展的回顾与展望. 干旱区地理, 2005, 28: 531–537.
- Ma L L, Zhan C S, Tang L L, Jiang X G. Review and prospect on the study progress in crop water requirements. *Arid Land Geogr*, 2005, 28: 531–537 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李俊颖, 吴克宁, 宋文. 基于作物营养当量修正产量比系数法的农用地质量分等. 农业工程学报, 2019, 35(9): 238–245.
- Li J Y, Wu K N, Song W. Farmland quality classification based on productive ratio coefficient modified by crop nutrition equivalent unit. *Trans CSAE*, 2019, 35(9): 238–245 (in Chinese with English abstract).
- [20] 周立华, 李一兴, 孙武刚. 银北主要农作物、蔬菜、牧草、树木的需水量和需水规律. 宁夏农学院学报, 1997, 18(2): 82–87.
- Zhou L H, Li Y X, Sun W G. Water requirement and water requirement law of main crops, vegetables, herbage and trees in Yinbei. *J Ningxia Agric Coll*, 1997, 18(2): 82–87 (in Chinese).
- [21] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展. 水科学进展, 2000, 11: 99–104.
- Wang H X, Liu C M. Advances in crop water use efficiency research. *Adv Water Sci*, 2000, 11: 99–104 (in Chinese with English abstract).