

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2021.0094

赵长龙,邢英梅,董心亮,等.河北低平原区坑塘水水量水质变化特征及影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):900-909. ZHAO C L, XING Y M, DONG X L, et al. Analysis on variation characteristics and influencing factors of water quantity and quality of ponds in Hebei low plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5):900-909. (in Chinese)

# 河北低平原区坑塘水水量水质变化特征及影响因素

赵长龙<sup>1,2</sup>,邢英梅<sup>3</sup>,董心亮<sup>1</sup>,王金涛<sup>1</sup>,孙宏勇<sup>1,2</sup>

(1. 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;  
3. 河北水文工程地质勘察院,石家庄 050021)

**摘要:**利用遥感技术分析沧州市1990、2000、2010和2019年等4个年份中在5月和10月的坑塘水水面面积,通过典型坑塘定位监测、区域调查取样结合ArcGIS软件分析坑塘水水质周年的变化与空间分布特征,综合坑塘水水量水质时空变化特征和主要作物需水特征评估典型年份研究区坑塘水的灌溉保障能力。研究表明:沧州市坑塘水体的空间分布呈东多西少的格局,坑塘水体的含盐量亦呈现东高西低的趋势。从时间分布来看,近30年来坑塘蓄水量总体呈增长趋势。通过影响因素分析,明确降水与蒸发是影响研究区坑塘水体增长的主要驱动因子,距离渤海的远近与地形地势是影响坑塘水含盐量分布格局的主要因素。沧州市坑塘多年平均蓄水量达到6.02亿m<sup>3</sup>,典型年份沧州市坑塘水分别能保障6807 km<sup>2</sup>的冬小麦拔节期灌溉与7104 km<sup>2</sup>的冬灌面积。坑塘水作为农业灌溉水源对于缓解河北低平原区水资源短缺意义重大。

**关键词:**坑塘水体;水量水质;变化特征;驱动因子;河北低平原

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



作为我国重要粮食生产基地的河北低平原区是我国缺水最为严重的区域,农业用水约占其用水总量的70%<sup>[1]</sup>。从20世纪80年代以来,农作物的高产丰产主要依靠高强度的抽取深层地下水进行灌溉,连年的深层地下水抽取使该区域形成了世界最大的地下水漏斗<sup>[2]</sup>。同时,该区域受季风气候的影响,降水年内分配不均,在雨季形成的雨洪资源有70%~84%直接流入渤海,没有得到充分利用<sup>[3]</sup>。作为调蓄雨洪资源的重要介质,国内外众多学者<sup>[4-8]</sup>对其进行了研究,结果表明:坑塘能有效地调控雨水资源时空分布,对缓解区域水资源短缺意义重大。因此,研究坑塘水的时空变化特征,评估坑塘水的灌溉利用潜力,对减少河北低平原区

深层地下水开采和保障农业灌溉具有非常重要的现实意义<sup>[9]</sup>。

近年来,随着遥感技术的不断发展,其越来越多地应用在分析坑塘湿地等水体时空变化特征等方面。赵浩等<sup>[10]</sup>与吕梦宇等<sup>[11]</sup>利用遥感技术提取了河北平原部分区域的坑塘水体,并估算了相应区域的静态蓄水量,研究表明河北平原区坑塘的蓄水量是可观的。多位学者的研究表明环渤海地区<sup>[12-14]</sup>、松嫩平原<sup>[15]</sup>、江汉平原<sup>[16]</sup>等多地的湿地面积近几十年来均呈现下降的趋势,气候与人类活动是主要的影响因素。罗玲等<sup>[15]</sup>研究表明:人类活动是影响湖泊、水库等大面积水体变化的主要因素;对于坑塘等小面积水体,气候因素的

收稿日期:2020-12-07 修回日期:2021-06-18 网络出版时间:2021-06-25

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210625.1001.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0300504)

作者简介:赵长龙(1993—),男,湖南邵阳人,主要从事农田水盐运移过程及调控研究。E-mail:zhaocl0812@163.com

通信作者:孙宏勇(1974—),男,河北衡水人,研究员,博士,主要从事农田水盐运移过程及调控研究。E-mail:hysun@sjziam.ac.cn

影响更为显著。坑塘水体受降水影响较大,不同的降水年型对坑塘蓄水面积有较大影响<sup>[11]</sup>。人类活动对坑塘水体的变化也存在着重要的影响<sup>[17]</sup>,就台湾桃园地区而言,坑塘的消失主要受人类活动影响,出现了明显的萎缩现象<sup>[18]</sup>,而河北平原地区建设取土形成了大量的坑塘<sup>[9]</sup>。坑塘水体的分布与区域气候、地理条件密切相关,就河北低平原地下水压采区来说,坑塘呈现东北多西南少的格局,东北部为环渤海地区,降水相对西南部更为丰富<sup>[10]</sup>。坑塘的分布也与海拔、地形、耕地以及居民的分布特点等有关,不同地区分布有所差异,如:三峡库区,坑塘主要分布在耕地集中区<sup>[4]</sup>;江汉平原,坑塘主要分布在湖泊周边<sup>[16]</sup>;河北平原区,坑塘主要分布在村庄附近<sup>[9]</sup>。

当前国内外学者对坑塘的功能效益与时空分布特征均进行了研究探讨,但对坑塘水水量水质特征及其应用的综合分析仍然较少。因此,利用调查取样和遥感分析相结合的方法,研究河北低平原区坑

塘水水量水质的变化特征,进而分析坑塘水作为灌溉水源的保障能力,为该区域水资源合理利用与农业灌溉提供科学依据。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

沧州市位于河北省东南部,东临渤海,南与山东为邻,北接天津、廊坊,西南与保定、衡水相接,是河北低平原区的典型区域。位于北纬  $37^{\circ}28' \sim 38^{\circ}57'$ 、东经  $115^{\circ}42' \sim 117^{\circ}50'$ ,南北跨度 165 km,东西跨度 187 km,全市总面积 14 056 km<sup>2</sup>,见图 1。全境地势低平,自西南向东北倾斜,西部黄海地面高程约为 14.0 m,东部多在 2.0 m 左右。沧州市属暖温带半湿润大陆性季风气候,全市多年平均气温为 12.2 ℃,无霜期 210 d 左右,多年平均日照 2 783 h,年平均降水量为 490~590 mm,降水量年内分布不均,主要集中在 6—9 月。多年平均水面蒸发量为 1 264.0 mm<sup>[19]</sup>。

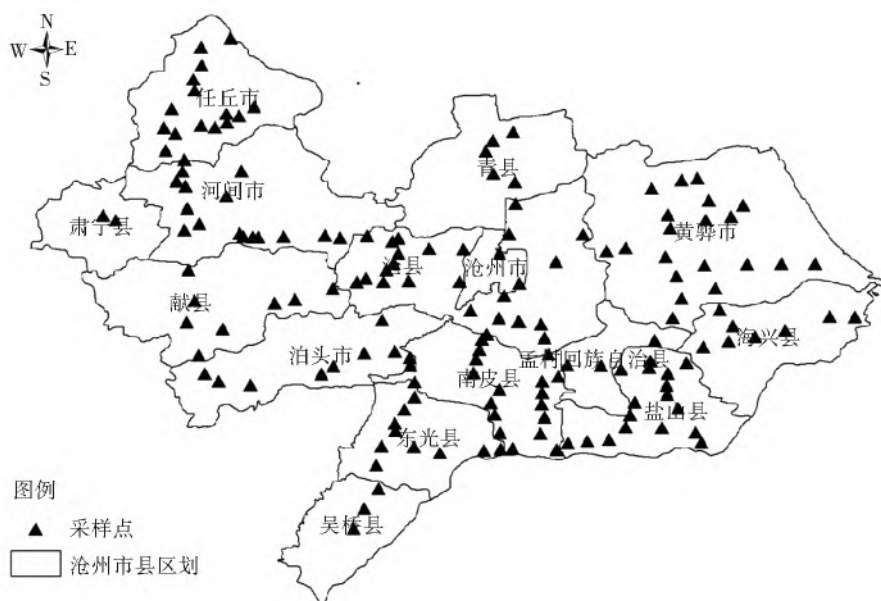


图 1 研究区地理位置和坑塘水采样点分布情况

Fig. 1 Geographical location of the study area and distribution of sampling points of pond water

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据的获取

遥感数据。为实现沧州市坑塘水体面积信息的提取,选用沧州市 1990 年和 2000 年时段 Landsat 4-5 TM 卫星影像、2010 年 landsat 7 卫星影像和 2019 年时段 Landsat 8 OLI\_TIRS 卫星影像数据作为数据源。沧州市降水主要集中在 6—9 月,以雨季开始前的 5 月以及雨季结束后的 10 月作为研究时期,以探究降水对坑塘蓄水的影响。遥感影像数据

来自于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>),为不影响水体提取结果,研究区内所有影像的云量均小于 5%。遥感影像数据的具体情况见表 1。

气象数据。气象资料来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),为泊头与黄骅 2 个国家基本气象站建站以来的日值气象资料,包括降水、温度、相对湿度、风速以及日照时数。黄骅气象站位于沧州东部,泊头气象站位于沧州西部,基本能代表沧州市的气象情况。

表 1 所用遥感影像数据及其特征  
Tab. 1 Remote sensing image data and its characteristics

项目	Landsat TM		Landsat 7		Landsat 8 OLI_TIRS	
	波段	光谱范围/ $\mu\text{m}$	波段	光谱范围/ $\mu\text{m}$	波段	光谱范围/ $\mu\text{m}$
波段及光谱范围	TM-1	0.45~0.52	Band 1	0.45~0.52	Band 1	0.43~0.45
	TM-2	0.52~0.60	Band 2	0.52~0.60	Band 2	0.45~0.51
	TM-3	0.63~0.69	Band 3	0.63~0.69	Band 3	0.53~0.59
	TM-4	0.76~0.90	Band 4	0.76~0.90	Band 4	0.64~0.67
	TM-5	1.55~1.75	Band 5	1.55~1.75	Band 5	0.85~0.88
	TM-6	10.40~12.50	Band 6	10.40~12.50	Band 6	1.57~1.65
	TM-7	2.08~2.35	Band 7	2.08~2.35	Band 7	2.11~2.29
			Band 8	0.52~0.90	Band 8	0.50~0.68
					Band 9	1.36~1.38
					Band 10	10.60~11.19
					Band 11	11.50~12.51
空间分辨率	TM-6 热红外波段空间分辨率为 120 m, 其余波段空间分辨率均 30 m		Band 6 热红外波段空间分辨率为 120 m, Band 8 全色波段空间分辨率为 15 m, 其余波段空间分辨率为 30 m		Band 8 全色波段空间分辨率为 15 m, Band 10 与 Band 11 热红外波段空间分辨率为 100 m, 其余波段空间分辨率为 30 m	

坑塘水盐分数据。为探究坑塘水质的年内变化,以南大港农林科学研究所内的坑塘水为例,从 2019 年 3 月开始,每月月底采集水样,在实验室测定其电导率与 pH 值。为研究分析沧州市坑塘水体的含盐量分布变化情况,于 2019 年 12 月上旬对沧州全域的坑塘进行了随机采样。采样坑塘共 162 个,每个坑塘采集 2 个水样,并通过 GPS 对采样点进行定位。在实验室测定了水样的 pH,电导率以及八大离子( $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ )质量浓度。八大离子的测定采用常规的化学测定方法——滴定法,其中  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{CO}_3^{2-}$  采用双指示剂中和法, $\text{SO}_4^{2-}$  采用 EDTA 间接络合滴定法, $\text{Cl}^-$  采用  $\text{AgNO}_3$  滴定法, $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  采用 EDTA 滴定法, $\text{K}^+$  +  $\text{Na}^+$  采用阴阳离子平衡法,总盐量为八大离子质量浓度之和。

### 1.2.2 数据处理方法

遥感数据处理方法。研究的影像预处理包括辐射定标、大气校正、几何校正、图像融合等。当前,水体的提取方法主要有单波段阈值法、谱间关系法、差值法、比值法、水体指数法等<sup>[20]</sup>。Mcfeeters<sup>[21]</sup> 提出的归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)法,能够抑制植被信息,强化水体信息,从而能够快速提取水体信息。徐涵秋<sup>[22]</sup> 在 Mcfeeters 的基础上提出了改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)法,MNDWI 克服了 NDWI 提取水体信息过程中背景建筑物的影响,对细小水体或浅水体的

反映程度较 NDWI 强。本研究采用 MNDWI 法提取坑塘水体信息,其公式<sup>[22]</sup>为

$$I_{\text{MNDWI}} = \frac{(P_{\text{Green}} - P_{\text{MIR}})}{(P_{\text{Green}} + P_{\text{MIR}})} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{MNDWI}}$ 为量化的改进归一化差异水体指数值; $P_{\text{Green}}$ 为绿波段; $P_{\text{MIR}}$ 为中红外波段。 $P_{\text{Green}}$ 在 Landsat 4-5 TM 影像中为第 2 波段,在 Landsat 8 OLI\_TIRS 影像中为第 3 波段,在 Landsat 7 影像中为第 2 波段。 $P_{\text{MIR}}$ 在 Landsat 4-5 TM 影像中为第 5 波段,在 Landsat 8 OLI\_TIRS 影像中为第 6 波段,在 Landsat 7 影像中为第 5 波段。

坑塘水体信息提取流程为:(1)在 ENVI 平台下分别计算 1990、2000、2010 和 2019 年 5 月和 10 月遥感影像的 MNDWI;(2)对单幅影像结果进行图像拼接;(3)判定水体和非水体的影像阈值,对拼接后的数据结果进行二值化,将水体赋值为 0,将非水体赋值为 -1;(4)栅格文件转成矢量文件,去除非水体和噪声;(5)人工去除云、河道和大型水库以及海岸滩涂和盐田等非坑塘水体,最终得到沧州市的坑塘分布结果。

坑塘水盐分数据的处理方法。研究采用 ArcGIS 10.2 软件对研究区内坑塘水体的含盐量进行空间插值,绘制坑塘水体的含盐量空间分布图,并对含盐量空间分布栅格图像进行重分类(reclassify)得出不同含盐量范围的分布面积。ArcGIS 插值的方法有样条(spline)插值、反距离权重插值(inverse distance weighted, IDW)与克里金(krig-

ing)插值等。研究采用反距离权重插值法对研究区坑塘水体的含盐量进行插值。反距离权重插值是指通过对邻近区域的每个单元值进行平均运算来获得目标单元的值,距目标单元中心越近的点估算值的影响越大。

坑塘蓄水量的计算方法。根据沧州市地方水利部门对南皮县境内 200 余个坑塘的实际调查结果,得出坑塘水面面积与蓄水量的关系,即坑塘蓄水库容曲线<sup>[12]</sup>,其公式为

$$y=4.029x+0.1783 \quad R^2=8439 \quad (2)$$

式中: $y$ 为坑塘蓄水量,万  $m^3$ ;  $x$ 为坑塘总的水面面积,  $hm^2$ 。本文采用该公式作为坑塘蓄水量的计算依据。

## 2 结果分析

### 2.1 坑塘水体的时空分布特征与水量估算

基于 MNDWI 方法提取 1990、2000、2010 和 2019 年等 4 个年份中 5 月与 10 月的坑塘水体分布信息(图 2 与图 3)。结果表明:研究区内坑塘水体的空间分布呈东多西少的趋势,沧州市东部地区主要以滨海盐碱区(黄骅、海兴)和旱作区(盐山、沧县)分布最为密集。其原因可能是该区域濒临渤海,总体海拔较低,洼淀分布较多且地下水埋深较浅。此外沧州西北部的任丘市坑塘分布也较为密集,其主要是受白洋淀的影响。

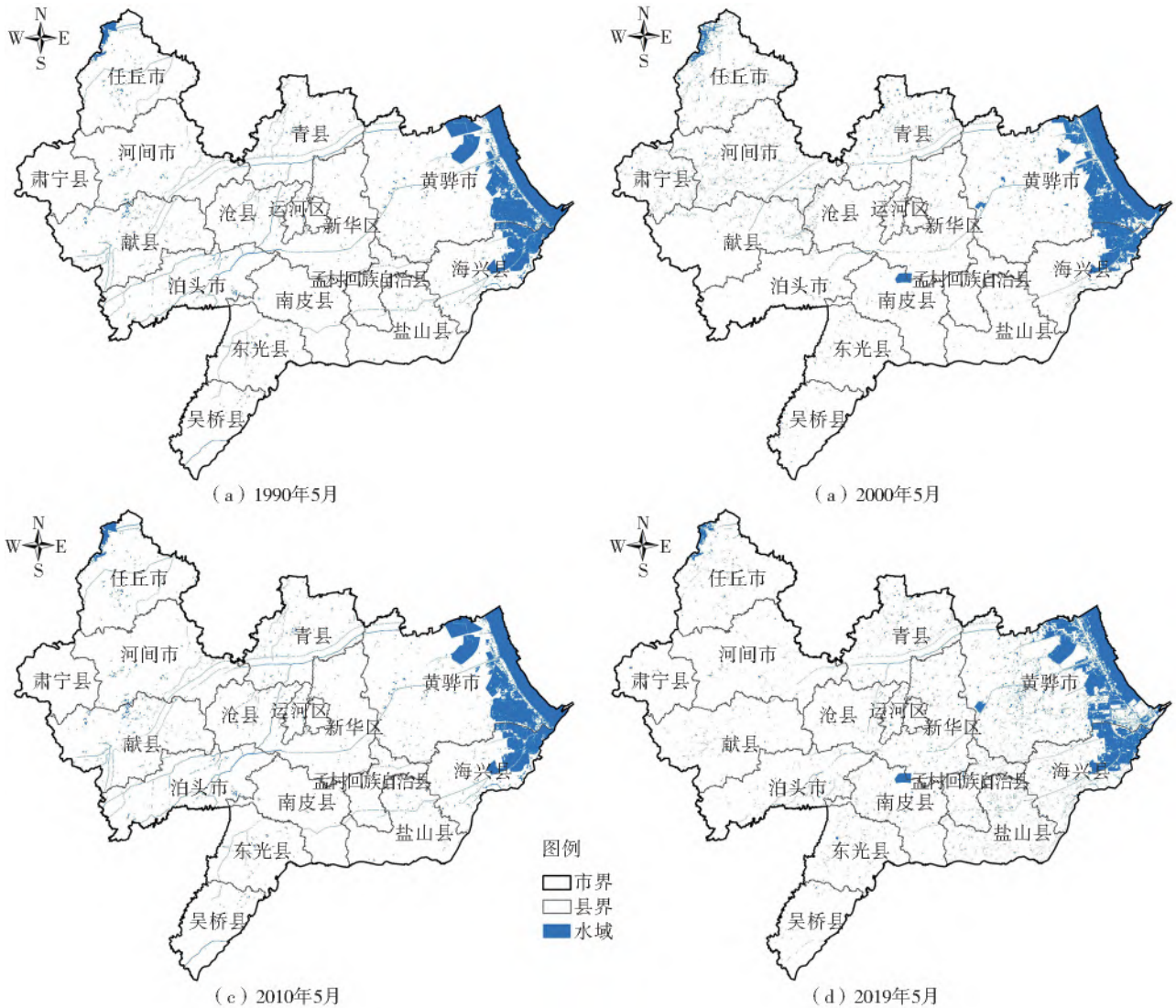


图 2 研究期间 5 月沧州市坑塘水体分布

Fig. 2 Distribution maps of pond water body in Cangzhou in May

根据坑塘库容曲线和通过遥感技术提取的坑塘面积,分别计算沧州市 1990、2000、2010 和 2019 年 5 月与 10 月的坑塘蓄水量,多年平均蓄水量约为 6.02 亿  $m^3$ ,各时期坑塘蓄水情况见图 4。

研究表明:近 30 年来,沧州市坑塘的总

蓄水量呈现先下降再增加的变化趋势。总体来说,坑塘的蓄水量略有增加。研究期内,坑塘的总蓄水量 2019 年最大,2000 年最小。从年内雨季前后来看,5 月坑塘的蓄水量明显高于 10 月,其主要与当地的降水 and 水面蒸发情况有关。研究区降水

主要集中在 6—9 月,其多年平均降水量约占全年平均降水量的 79.1%<sup>[20]</sup>。本研究亦对 1990、2000、2010 以及 2019 年该时段的降水量进行了统计分析,其分别为 412.6、546.5、497.5 以及 418.2 mm,分别占年降水量的 60%、90%、80%与 80%。该时段亦为一年当中蒸发耗散最快的时段,1990、2000、2010 以及 2019 年该时段的蒸发量分别为

610.1、683.4、607.6 以及 650.4 mm,其均占相应年份总蒸发量的 50%,分别比降水量多 197.6、137.9、110.1 以及 232.2 mm。另外 6 月中下旬夏玉米播种前以及 9 月底冬小麦播种前浇地也使用了部分坑塘水,故该时段出现了坑塘水损耗量大于补给量的情况,从而 5 月坑塘的蓄水量大于 10 月坑塘的蓄水量。

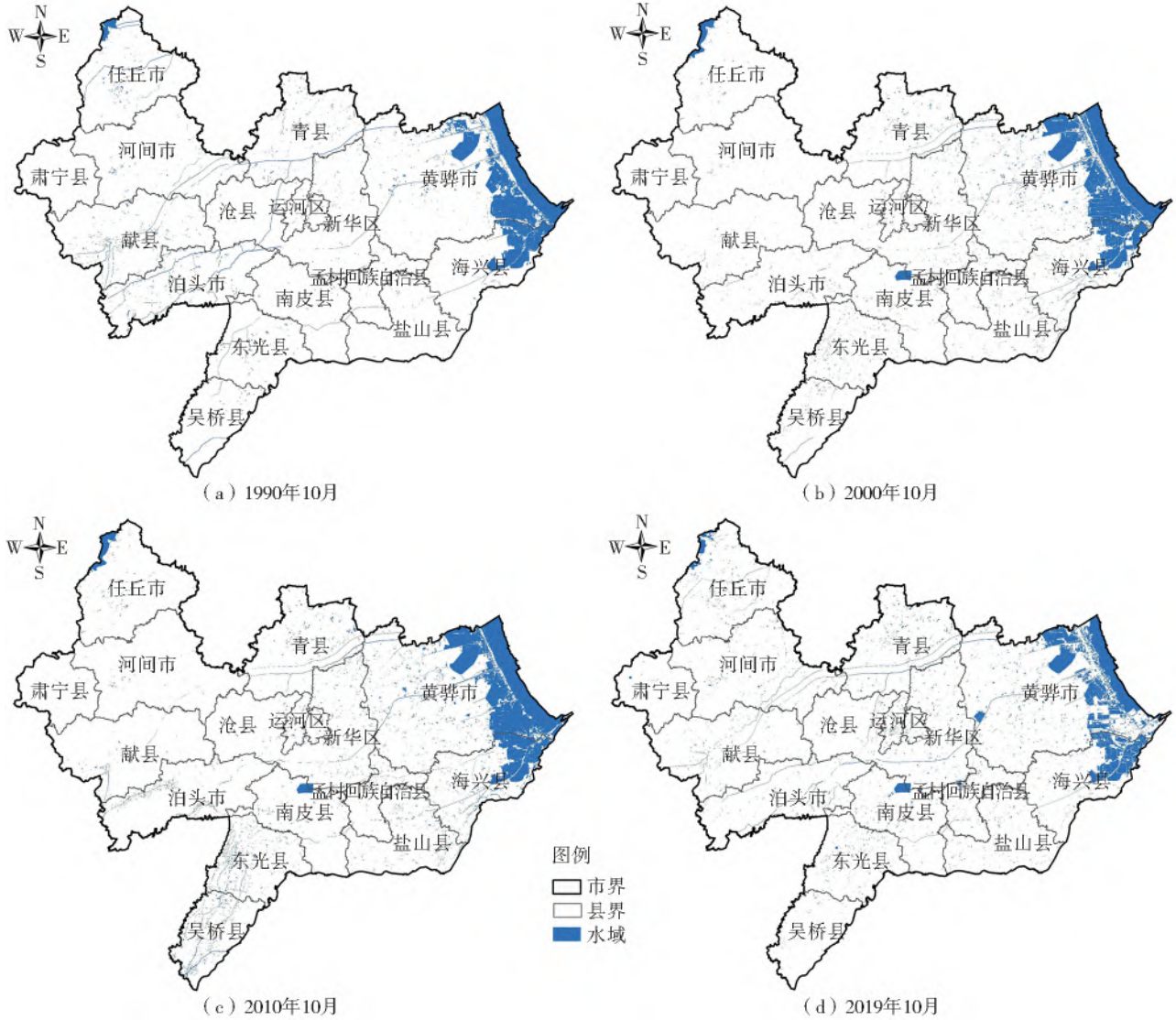


图 3 研究期间 10 月沧州市坑塘水体分布

Fig. 3 Distribution maps of pond water body in Cangzhou in October

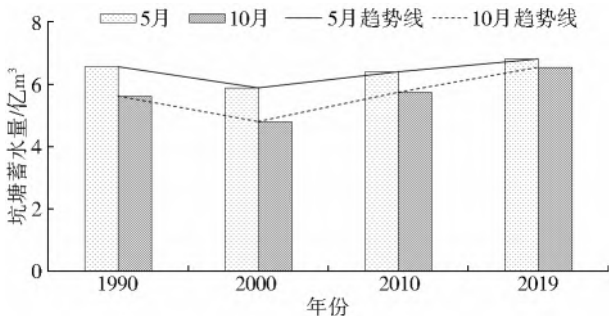


图 4 研究期间坑塘蓄水量变化统计

Fig. 4 Statistics of changes in water storage of ponds during the study period

## 2.2 坑塘水质的时空变化特征

以南大港农林科学研究所内典型坑塘为例,分析坑塘水质的变化特征。由图 5 可知:当坑塘水深大时,坑塘水体的电导率较小,含盐量相对较低;当坑塘水浅时,坑塘水体的含盐量相对较高。统计分析结果表明,坑塘水体的电导率与坑塘的水深总体呈负相关关系,相关系数为-0.81。坑塘水体的含盐量与坑塘水体的体积总体呈负相关,即坑塘蓄水量大则坑塘水的盐分质量浓度低,蓄水量小则质量浓度高。

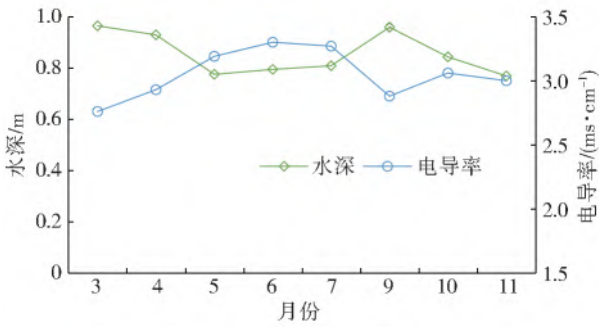


图5 坑塘水质的年内变化情况

Fig. 5 Changes of water quality in the study pond in 2019

2019年12月,对沧州市全域范围内的坑塘进行了随机采样,坑塘水质空间变化情况见图6。坑塘分布密集的沧州东部地区(海兴、黄骅、沧县东部),坑塘水含盐量较高(多数大于5 g/L),该部分坑塘水不适宜于农业灌溉。坑塘分布相对较稀少的沧州西部地区(肃宁、河间、献县以及沧县西部)与南部地区(孟村、吴桥、盐山南部),坑塘水含盐量较低,水质较好(多数小于2 g/L),该区域内大部分坑塘水可用于农业灌溉。西北部靠近白洋淀的任丘市,坑塘分布较为密集,可用于农业灌溉的坑塘水资源丰富。中部地区大部分区域的坑塘水含盐量一般大于2 g/L且小于5 g/L,亦可用于农业灌溉。

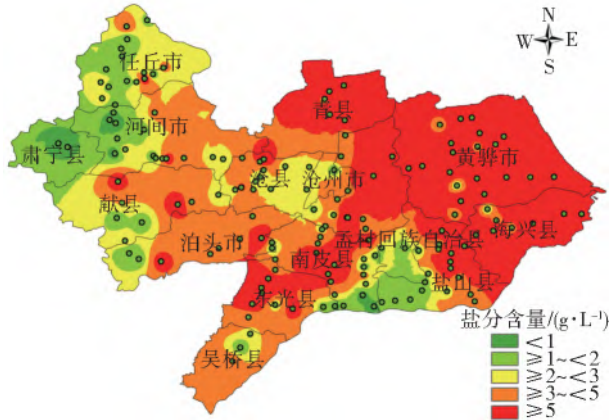


图6 沧州市坑塘水盐分空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of water in ponds with different salt content in Cangzhou

通过 ArcGIS 对插值图形进行重分类,得出沧州市不同含盐量范围的坑塘水的空间分布情况,淡水(<1 g/L)、弱矿化水(1~<2 g/L)、微咸水(2~<3 g/L)、半咸水(3~<5 g/L)与咸水(≥5 g/L)所分布区域的面积分别为 261.31、1 778.29、2 422.89、4 175.50以及 5 649.45 km<sup>2</sup>。

### 2.3 坑塘水体时空变化的影响因素分析

#### 2.3.1 水量变化影响因素分析

降水因子。统计分析沧州市 1960—2019 年的年降水量,根据统计结果通过频率分析法确定丰水

年(25%,662.8 mm)、平水年(50%,569.1 mm)以及枯水年(75%,492.8 mm),1990—2019 年的年降水变化见图 7。1990—2019 年,沧州市年降水量总体呈上升趋势,与沧州市坑塘的蓄水面积变化趋势一致。1990、2000、2010 和 2019 年的年降水量分别为 638.5、638.0、618.9 和 494.4 mm。1990 年与 2000 年的降水量基本一致,且前一年都为枯水年,然而 2000 年的坑塘蓄水面积明显少于 1990 年,其原因可能是 2000 年之前的 3 年中有一年是枯水年。2000 年的降水量较 2010 年与 2019 年多,而坑塘的蓄水面积较其他 2 年少,其原因是 2010 年与 2019 年前几年降水较为丰富,其中 2009 年为丰水年,2018 年尽管不是丰水年,但降水相对较为充足。总体而言,降水量的增加使得研究区的坑塘获得了更多的水源补给。

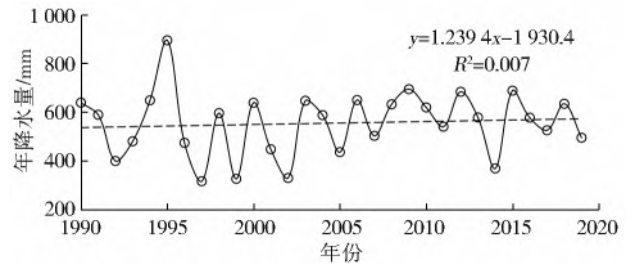


图7 1990—2019 年研究区降水情况

Fig. 7 Precipitation in the study area from 1990 to 2019

蒸发因子。研究统计 1990—2019 年各年的水面蒸发量,水面蒸发量采用付学功等<sup>[24]</sup>修订的彭曼公式进行计算,以河北省衡水实验站 E20 蒸发池(20 m<sup>2</sup>)的数据为基础对彭曼公式进行了修正改进,其能代表河北低平原地区的实际水面蒸发量。1990—2019 年水面蒸发情况见图 8,由图 8 可以看出,1990—2000 年大致呈上升趋势,其加剧了坑塘水的耗散。2000—2010 年呈下降趋势,2010—2019 年蒸发量波动较大。1990—2019 年,水面蒸发量总体呈现下降的趋势,其在一定程度上减缓了坑塘水体耗散的速度。

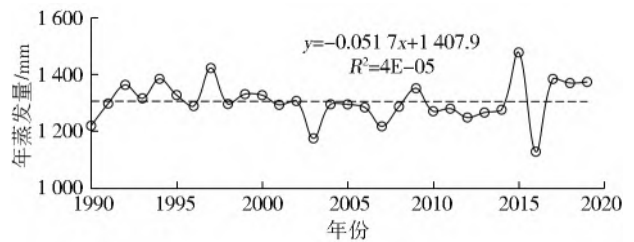


图8 1990—2019 年研究区水面蒸发情况

Fig. 8 Water surface evaporation in the study area from 1990 to 2019

#### 2.3.2 水质变化影响因素分析

含盐量是衡量水源是否可用于农业灌溉的基本

指标之一,故仅对坑塘水的含盐量进行相应探讨。就单个坑塘而言,坑塘水体的含盐量与坑塘水体的体积呈负相关,而坑塘水体的体积主要受降水与地下水等因素的影响。降水发生时,雨水与地表径流对坑塘水体进行补充,此部分补给水体的含盐量较低,能够起到稀释坑塘水的作用。地下水与坑塘水的交换是一个动态平衡的过程,其取决于地下水与坑塘水的水位差,盐离子的交换亦是动态平衡的。因此,坑塘水体含盐量的季节变化主要受降水的影响。

就沧州市而言,坑塘水含盐量总体呈东高西低的格局,含盐量最高的区域是黄骅和海兴地区。沧州东部地区滨临渤海,海拔低,受海水影响显著,地下水含盐量高,且埋深浅,与坑塘水交换频繁,故东部地区坑塘水的含盐量较高。沧州市地势总体呈西高东低,沧州市越往西,离海越远,地势也越高,受海水影响越小,其土壤与地下水的含盐量均低于滨海地区,故而西部地区坑塘水的含盐量要低于东部地区。距离渤海的远近与地形地势是影响沧州市坑塘水含盐量分布格局的主要因素。

#### 2.4 坑塘水的灌溉保障能力分析

以 2019 年为例,2019 年 5 月与 10 月沧州市坑塘总蓄水量分别为 6.79 亿  $\text{m}^3$  与 6.52 亿  $\text{m}^3$ 。根据陈素英等<sup>[24]</sup>的研究,在淡水资源紧缺的地区,矿化度不超过 5 g/L 的微咸水可用于农业灌溉。通过实地调研结合 ArcGIS 软件研究分析了沧州市不同含盐量范围的坑塘水的分布情况,并统计了沧州各县市坑塘水可用于灌溉区域的占比情况。2019 年 5 月和 10 月沧州各县市坑塘蓄水量与可灌溉区域面积占比情况见表 2。

2019 年沧州市 4、5 月的降水量分别为 30.6、12.9 mm,蒸发量分别为 120.4、191.6 mm。由此可以推断 2019 年 4 月(冬小麦拔节期),该区域内坑塘的蓄水量应不小于 5 月。拔节期该区域坑塘蓄水情况参考 5 月,在不考虑坑塘死库容的情况下,由此可估计沧州市 4 月份大约有 5.11 亿  $\text{m}^3$  坑塘水可用于拔节期灌溉。拔节期灌水量以 750  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  计,约可保障 6 807  $\text{km}^2$  的灌溉面积。2018 年沧州市冬小麦的播种面积是 3 737.5  $\text{km}^2$ ,坑塘水可满足拔节期的灌溉需求。2019 年 10 月沧州市大约有 5.33 亿  $\text{m}^3$  坑塘水可用于农业灌溉,冬灌同样以 750  $\text{m}^3/\text{hm}^2$  计,则其可保障 7 104  $\text{km}^2$  的灌溉面积。2019 年沧州市冬小麦的播种面积为 3 360  $\text{km}^2$ ,坑塘水亦可满足沧州市的冬灌需求。沧州市坑塘分布不均匀,坑塘分布较稀疏的区域,坑塘水不能满足当地各时段的灌溉需求,部分区域坑塘水含盐量过高亦不能使

用坑塘水进行灌溉。因此,沧州市坑塘水并不能满足整个区域冬小麦的拔节期灌溉和冬灌的需求。根据坑塘水质空间分布的研究结果可知,沧州市坑塘水矿化度低于 5 g/L 的区域约占总面积的 60%,故冬灌或拔节期坑塘水能保障的灌溉面积应不超过冬小麦种植面积的 60%。就整个沧州区域来说,坑塘水可用于灌溉的量是非常可观的,故可利用坑塘水灌溉的区域应尽量使用坑塘水进行灌溉,其对缓解沧州市水资源短缺具有重要意义。

表 2 沧州各县市坑塘蓄水量与可灌溉区域面积占比情况  
Tab. 2 Water storage capacity of ponds and the proportion of irrigable area in counties of Cangzhou

县(市)	坑塘蓄水量/亿 $\text{m}^3$		可灌区域占比/ %
	5 月	10 月	
任丘	1.12	1.17	98.8
河间	0.12	0.35	89.2
肃宁	0.03	0.04	100.0
沧县	0.36	0.39	53.1
沧州	0.10	0.19	93.9
献县	0.12	0.26	83.8
青县	0.12	0.13	20.5
黄骅	1.27	1.08	6.4
泊头	0.20	0.31	72.0
东光	0.10	0.12	57.1
南皮	0.43	0.45	61.2
吴桥	0.05	0.05	100.0
海兴	0.62	0.52	7.9
盐山	0.31	0.11	71.0
孟村	0.14	0.13	78.9

### 3 讨论

沧州市坑塘总蓄水量要远大于李少华等<sup>[3]</sup>的统计结果,其原因可能是李少华等主要是通过实地调查,部分坑塘未能进行统计,而通过遥感技术可以全面提取研究区的坑塘水体。沧州市坑塘分布总体呈东多西少的格局,与赵浩等<sup>[10]</sup>研究结果一致。近 30 年来,沧州市坑塘蓄水面积总体呈现上升的趋势,其与赵浩等<sup>[10]</sup>的研究结果有所差异。由于研究范围有所不同,且本研究年限更长,相对来说能更准确地反映沧州市坑塘水体的总体变化情况。近 30 年来,沧州市降水量呈现上升的趋势,坑塘的自然补给水量总体亦呈现增长趋势。近 30 年来,沧州市水面蒸发量总体呈现下降的趋势,其与全国的情况一致<sup>[25-27]</sup>。降水量的增加以及蒸发量的减少是促使坑塘蓄水面积增长的主要气象因素。坑塘水体含盐量

的分布总体呈现东高西低的格局。坑塘水的采样时间是2019年12月,实际调研过程中发现,西部地区的坑塘水位普遍较低,部分坑塘甚至发生了干涸现象,该时期研究区的坑塘水位处于较低的水平。该时期坑塘水的含盐量可能处于一个比较高的水平,尤其是沧州西部地区的坑塘。因此,该时期坑塘水的含盐量与蓄水丰富的月份相比可能有所差异,但其所展现的坑塘水体含盐量分布格局能够代表沧州市的整体情况。对于丰水季节,坑塘水位高于12月,沧州市坑塘水含盐量小于5 g/L的区域范围应大于以此估计的范围。

本文对沧州市坑塘蓄水量的估算是基于南皮县水利部门对200余个坑塘蓄水面积与蓄水量的调研统计得出的经验公式,该公式的建立以南皮县域内的坑塘为基础。南皮县位于沧州市中部,同时其作为渤海粮仓科技工程示范区,具有一定的代表性,但依据该公式估算的蓄水量与实际情况可能仍存在一定的差异。同时,沧州市坑塘水对冬小麦冬灌及拔节期灌溉保障程度的计算基于各县市坑塘分布均匀的假设,以坑塘水含盐量小于5 g/L的区域面积占比估算可利用坑塘水体的总量,其与实际情况可能存在一定的差异。相对以往关于坑塘灌溉保障能力的研究<sup>[10-11]</sup>,本研究考虑了水质的影响,可灌溉水量的估算相对更为精确,同时也基本确定了沧州市坑塘水可灌溉区域的范围。就沧州市来说,坑塘水用于农业灌溉的潜力是巨大的。

#### 4 结 论

沧州市坑塘的分布大致呈东多西少的格局,坑塘分布最多的区域为沿海地区以及西北角靠近白洋淀的任丘市。降水和蒸发是影响坑塘蓄水量变化的主要气象因子,降水量的增加与蒸发量的减少促使坑塘蓄水量发生增长现象。研究区坑塘水体的含盐量亦呈东高西低的格局,其与距渤海的距离有关,海水对坑塘水的含盐量有重要影响。沧州市坑塘多年平均蓄水量为6.02亿m<sup>3</sup>。以2019年为例,可用于冬小麦拔节期灌溉的坑塘水量约为5.11亿m<sup>3</sup>,冬灌可利用的坑塘水量约为5.33亿m<sup>3</sup>,其分别能保障6807 km<sup>2</sup>的小麦拔节期灌溉面积和7104 km<sup>2</sup>的冬灌面积。沧州市坑塘水的利用潜力是巨大的,其对缓解河北低平原区的水资源短缺具有重要的现实意义。

#### 参考文献(References):

[1] 张光辉,连英立,刘春华,等. 华北平原水资源紧缺情势

- 与因源[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 172-176. (ZHANG G H, LIAN Y L, LIU C H, et al. Situation and origin of water resources in short supply in North China Plain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 172-176. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-6561.2011.02.012.
- [2] 秦欢欢,孙占学,高柏,等. 气候变化影响下华北平原地下水可持续利用研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 106-114. (QIN H H, SUN Z X, GAO B, et al. Simulating dynamics of groundwater in North China Plain under uncertain climate change[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 106-114. (in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.gggs.20190133.
- [3] 李少华,李岩,郭玉起,等. 沧州区域雨洪资源拦蓄能力分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 91-94. (LI S H, LI Y, GUO Y Q, et al. Analysis of interception ability of rainfall flood resources in Cangzhou City[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(5): 91-94. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2010.05.022.
- [4] 马晓燕,王玉宽,傅斌,等. 三峡库区典型流域塘库服务功能类型及空间分布[J]. 人民长江, 2016, 47(17): 36-41. (MA X Y, WANG Y K, FU B, et al. Service functions of ponds and spatial distribution pattern in typical watershed in Three Gorges Reservoir area[J]. Yangtze River, 2016, 47(17): 36-41. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.17.008.
- [5] 毛战坡,尹澄清,单宝庆,等. 水塘系统对农业流域水资源调控的定量化研究[J]. 水利学报, 2003(12): 76-83. (MAO Z P, YIN C Q, SHAN B Q, et al. Regulation function of multi-pond system for water resources in a watershed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(12): 76-83. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2003.12.012.
- [6] NGIGI S N, SAVENIJE H H G, THOME J N, et al. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya[J]. Agricultural Water Management, 2005, 73(1): 21-41. DOI:10.1016/j.agwat.2004.09.021.
- [7] CARVAJAL F, AGÜERA F, SÁNCHEZ-HERMOSILLA J. Water balance in artificial on-farm agricultural water reservoirs for the irrigation of intensive greenhouse crops[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 146-155. DOI:10.1016/j.agwat.2013.09.006.
- [8] OUYANG Y, FENG G, READ J J, et al. Estimating the ratio of pond size to irrigated soybean land in Mississippi: A case study[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2016, 16(6): 1639-1647. DOI: 10.2166/ws.2016.087.
- [9] 孙宏勇,刘小京,闵雷雷,等. 农村坑塘蓄水利用的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016(A01): 17-19. (SUN



- H Y, LIU X J, MIN L L, et al. Study on water collection and utilization of farm ponds[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science Technology, 2016 (A01):17-19. (in Chinese))
- [10] 赵浩,张瑞芳,齐永青,等. 河北省地下水压采工程区坑塘水体动态变化分析[J]. 节水灌溉, 2017(7): 66-69,76. (ZHAO H, ZHANG R F, QI Y Q, et al. Dynamics analysis of pit-ponds water in groundwater restricted exploitation area in Hebei Province[J]. Water Saving Irrigation, 2017(7): 66-69,76. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-4929.2017.07.014.
- [11] 吕梦宇,王仕琴,齐永青,等. 华北低平原区降水与坑塘蓄水响应关系研究:以河北省南皮县为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1796-1805. (LYU M Y, WANG S Q, QI Y Q, et al. Study on the relationship between precipitation and pond water storage in lowland area of north China plain: A case study in Nanpi County, Hebei Province[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(10): 1796-1805. (in Chinese)) DOI:10.31497/zrzyxb.20170942.
- [12] 温庆可,张增祥,徐进勇,等. 环渤海滨海湿地时空格局变化遥感监测与分析[J]. 遥感学报, 2011, 15(1): 183-200. (WEN Q K, ZHANG Z X, XU J Y, et al. Spatial and temporal change of wetlands in Bohai Rim during 2000-2008: An analysis based on satellite images[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(1): 183-200. (in Chinese)) DOI:10.11834/jrs.20110115.
- [13] 付颖,徐新良,通拉嘎,等. 近百年来北京市地表水体时空变化特征及驱动力分析[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 75-83. (FU Y, XU X L, TONG L G, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of surface water in Beijing over one hundred years[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 75-83. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; ZRZY. 0. 2014-01-009.
- [14] 吕金霞,蒋卫国,王文杰,等. 近 30 年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4492-4503. (LYU J X, JIANG W G, WANG W J, et al. Wetland landscape pattern change and its driving forces in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4492-4503. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201712232309.
- [15] 罗玲,毛德华,王宗明,等. 松嫩平原西部湖泊与水库/坑塘动态变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 285-291. (LUO L, MAO D H, WANG Z M, et al. Analysis of dynamics and driving forces of lakes and reservoirs in western Songnen Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 285-291. (in Chinese)) DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.039.
- [16] 韩鹏鹏,黄进良,李仁东,等. 基于面向对象的坑塘遥感监测与动态分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 272-277. (HAN P P, HUANG J L, LI R D, et al. Remote sensing monitoring and dynamic analysis of ponds based on object-oriented rules[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 272-277. (in Chinese)) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.038.
- [17] 张美美,张荣群,郝晋珉,等. 基于 ANN-CA 的银川平原湿地景观演化驱动力情景模拟分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(3): 418-425. (ZHANG M M, ZHANG R Q, HAO J M, et al. The scenarios simulation analysis of driving forces of wetland landscape evolution using ANN-CA in Yinchuan Plain [J]. Geo-information Science, 2014, 16(3): 418-425. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1047.2014.00418.
- [18] FANG W T, HUANG Y W. Modelling geographic information system with logistic regression in irrigation ponds, Taoyuan Tableland[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 505-513. DOI:10.1016/j.proenv.2012.01.310
- [19] 张可义,张传河,张雷. 沧州市水文特性分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(11): 1211-1212. (ZHANG K Y, SUN C H, ZHANG L. Analysis on hydrological characteristics of Cangzhou City[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(11): 1211-1212. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-7175.2010.11.005.
- [20] 梁泽毓,吴艳兰,杨辉,等. 基于密集连接全卷积神经网络的遥感影像水体全自动提取方法[J]. 遥感信息, 2020, 35(4): 68-77. (LIANG Z Y, WU Y L, YANG H, et al. Full-automatic water extraction method for remote sensing imagery based on densely connected fully convolutional neural network[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(4): 68-77. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-3177.2020.04.011.
- [21] MCFEETERS S. K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [22] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005(5): 589-595. (XU H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005(5): 589-595. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn.1007-4619.2005.05.012.
- [23] 付学功,董晓丽. 彭曼(Penman)公式在河北平原的应用[J]. 河北水利科技, 1995(2): 8-12. (FU X G, DONG X L. Application of Penman formula in Hebei Plain[J]. South to North Water Transfers and Water

- Science Technology, 1995 (2): 8-12. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;NSBD. 0. 1995-02-002.
- [24] 陈素英,邵立威,孙宏勇,等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016,24(8): 1049-1058. (CHEN S Y, SHAO L W, SUN H Y, et al. Effect of brackish water irrigation on soil salt balance and yield of both winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016,24(8): 1049-1058. (in Chinese)) DOI: 10. 13930/j. cnki. cjea. 160075.
- [25] ZHANG C G, LIU F G, SHEN Y J. Attribution analysis of changing pan evaporation in the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38 (+ 1): 1032-1043. DOI: 10. 1002/joc. 5431.
- [26] LI M, CHU R H, SHEN S H, et al. Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River basin, a climate transition zone in eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2018; 496-509. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 12. 317
- [27] YANG H B, YANG D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001[J]. Journal of Hydrology, 2012; 184-193. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 10. 043.

### Analysis on variation characteristics and influencing factors of water quantity and quality of ponds in Hebei low plain

ZHAO Changlong<sup>1,2</sup>, XING Yingmei<sup>3</sup>, DONG Xinliang<sup>1</sup>, WANG Jintao<sup>1</sup>, SUN Hongyong<sup>1,2</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, IGDB, CAS, Shijiazhuang 050022, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hebei Institute of Hydrological Engineering Geology, Shijiazhuang 050022, China)

**Abstract:** Hebei low plain (HLP) is one of the most important grain production bases in China. But, it is facing a shortage of freshwater resources problem from a long time. Ponds are important facilities for regulating and storing rainwater and flood resources in HLP area, and the utilization of pond water has attracted increasingly attention. With the continuous development in remote sensing technology, it is frequently applied to extract and analyse the water bodies such as ponds and wetlands, and it is main research means to study the temporal and spatial changes of pond water. However, there are few comprehensive studies on the quantity and quality of pond water at present. For HLP, the utilization value of unconventional pond water remains to be further studied.

Cangzhou was taken as a typical area of HLP. The quantity of the pond water in May and October of 1990, 2000, 2010, and 2019 in Cangzhou city were analyzed by the remote sensing technology, and the pond water was extracted using the MNDWI (modified normalized difference water index) method. Based on location monitoring of typical pond and regional sampling, the temporal and spatial variation characteristics of water quality of the ponds in Cangzhou were analyzed by ArcGIS software, the IDW (inverse distance weighted) was used to interpolate the salt content of pond water in the study area. The irrigation guarantee capacity of the pond water in the typical year was evaluated according to the variation characteristics of pond water quantity and quality and the irrigation water requirement characteristics of the main crop in the study area.

Most of the water bodies in the ponds were distributed in the eastern region near the Bohai Sea and the northwest near Baiyangdian. The spatial distribution trend of pond water was more in the east and less in the west. From 1990 to 2019, the storage capacity of the pond water in the study area showed a growing trend, which was consistent with the changing trend of the local precipitation, but opposite to the changing trend of water surface evaporation. The salt mass concentration in pond water in eastern Cangzhou was more than 5 g/L, which was not suitable for agricultural irrigation. In the west and south of Cangzhou, the water quality (mass concentration) of ponds was less than 5 g/L, which could be used for agricultural irrigation. In the typical year of 2019, the amount of pond water that can be used for irrigation at the jointing stage and pre-winter of winter wheat was about 511 million m<sup>3</sup> and about 533 million m<sup>3</sup>, respectively. It could guarantee an irrigation area with 6 807 km<sup>2</sup> at the winter wheat jointing stage and 7 104 km<sup>2</sup> pre-winter, respectively.

The spatial distribution of pond water bodies in Cangzhou was roughly in the pattern of more in the east and less in the west. Meanwhile, the salt content of the pond water in the eastern region of the study area was higher than that in the western region. The distance from the Bohai Sea and topography were the main factors affecting the spatial distribution pattern of water quantity and quality of ponds in the study area. In recent 30 years, the water quantity of ponds has generally been increasing. Precipitation and evaporation were the major driving factors affecting the change of pond water quantity in the study area. The average annual water storage of ponds in Cangzhou city has reached 602 million m<sup>3</sup>. As an agricultural irrigation water source, pond water is of great significance to alleviate the water shortage in HLP area.

**Key words:** pond water; water quantity and quality; change characteristic; driving factors; Hebei low plain