

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.002

农田灌溉水循环利用系统构建方法

王沛芳^{1,2},钱进^{1,2},胡斌^{1,2},王洵^{1,2},金秋彤^{1,2},胡诗瑶^{1,2},邱卫国³

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098; 3. 深圳市水务规划设计有限公司上海分公司,上海 201208)

摘要:介绍了将农田中坑塘湿地改建用于储存降雨径流和农田灌溉排水进行回用的水循环系统构建方法,在提出水循环调蓄湿地体积估算方法的基础上,构建了调蓄湿地水循环利用系统,分析了高效净污载体、微生物筛选与附着、水生植物群落配置和水动力微循环交换系统等水质净化技术,指出区域降水量和降雨历时是影响水循环调蓄湿地体积和循环水利用量的重要因素。对上海崇明水稻田循环调蓄湿地系统进行了设计与构建,循环调蓄湿地运行后共节约灌溉水量 6 239.9~9 359.9 m³。
关键词:农田;灌溉排水;水循环系统构建;调蓄湿地;上海崇明
中图分类号:S274 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)04-0007-06

Construction method of irrigation water recycling system of farmland

WANG Peifang^{1,2}, QIAN Jin^{1,2}, HU Bin^{1,2}, WANG Xun^{1,2}, JIN Qitong^{1,2}, HU Shiyao^{1,2}, QIU Weiguo³
(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Shenzhen Water Planning & Design Institute Co., Ltd., Shanghai Branch, Shanghai 201208, China)

Abstract: In this paper, the construction methods of water recycling system by the reconstruction of pond or wetland for storing rainfall runoff and reusing of irrigation drainage were introduced. The calculation method and design basis for the volume of water recycling reservoir were given. Based on the calculation method, the water recycling system of regulation and storage wetland was constructed. The water quality control techniques in the water recycling wetlands were also introduced, including the efficient purification carrier, screening and attachment of microorganisms, aquatic plant community arrangement, and hydrodynamic microcirculation exchange system. It was found that regional rainfall and rainfall duration are the important factors affecting reservoir volume and water recycling capacity. The design and construction of the cyclic regulation and storage wetland system in Shanghai Chongming paddy field were carried out. After the operation of the cyclic regulation and storage wetland, a total of 6 239.9–9 359.9 m³ of irrigation water was saved.
Key words: farmland; irrigation and drainage; construction of water recycling system; regulation and storage wetland; Shanghai Chongming

我国人均水资源比较缺乏,有 16 个省(自治区、直辖市)重度缺水,6 个省、区属于极度缺水。同时,我国的水资源开发利用中农业用水占 61.2%,远高于居民生活用水(占 14.5%)和工业生产用水(占 20.2%)^[1]。然而,当前我国农田灌溉水有效利用率仅为 55.9%^[2],与发达国家 70%~80% 的差距较大^[3]。特别是农业灌溉的排水回用不受重视,造成水资源的巨大浪费。近年来,国内外关于农业节水方面开展了大量的研究,主要包括:根据作物不同生长期需水要求,进行精准灌溉^[4];改进灌水技术,如喷灌、滴灌、微灌等^[5-6];处理后的中水进行消毒后再生利用^[7-8],但由于再生水可能存在污染风险,近年来已经不再作为灌溉水源^[9]。
我国南方地区和中东部地区的农田区域均分布有一定面积的自然坑塘湿地,可用于储存降雨径流和农田灌溉退水,并在作物需水时循环回用补充灌溉水源。这种方法不仅可以有效补充灌溉水和肥力,还可减少

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421006);宜兴市重大科技项目(宜科通[2021]13 号(1303))
作者简介: 王沛芳(1973—),女,教授,博士,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn
引用本文: 王沛芳,钱进,胡斌,等. 农田灌溉水循环利用系统构建方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):7-12.
WANG Peifang, QIAN Jin, HU Bin, et al. Construction method of irrigation water recycling system of farmland [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 7-12.

农田灌溉退水外排造成的面源污染^[10-11]。然而自然的坑塘洼地面积大小不等、数量不定,如何科学确定湿地面积和循环回用水系统仍是一项亟待深入研究的工作。本文给出了水循环回用的湿地储水池体积估算方法及影响因素,提出了农田灌溉水循环利用系统的构建方法,并通过实例计算了上海崇明水稻田循环调蓄湿地的体积,旨在为我国农田灌排系统水资源节约提供新思路,为我国乡村振兴和生态文明发展提供技术支撑。

1 水循环利用系统中调蓄湿地适宜体积的估算方法

农田灌溉水循环利用系统中,调蓄湿地的体积直接决定着一定面积的农田区域中储存水量的多少,即可以循环利用的水量大小。理论上调蓄湿地体积越大,通过循环利用节约的水量就越多。但是受土地利用面积有限的影响、水质保障的约束、地形地势等条件限制,水循环调蓄湿地的体积设计需要有科学依据。前人从农田排水水质净化的角度,研究了湿地面积与农田面积的比例(较小1%~2%^[12],较大5%~7%^[13])。国外一般采用农田缓冲带的概念,在土地利用不紧张的地区设计比例更大的缓冲带(10%~15%)^[14]。近年来的工程实践中,为保障干旱状况下农田灌溉用水量,也有将现有坑塘改造扩大以满足特定条件下的抗旱要求。这部分坑塘容积主要与区域干旱程度、干旱条件下农田灌溉保证率的选取有关。

调蓄湿地体积设计与区域气象条件、降水量、土地利用情况和地形地势及水质情况等密切相关。本文根据这些主要影响因素,给出考虑区域降水、灌溉水量、水量蒸发散失和渗漏损失、土地利用及水质保障的水力停留时间5个主要方面的调蓄湿地体积 V 估算方法^[15-16]:

$$V = Sp t_1 + (Q_{in} - Q_{los}) t_2 - Q_{out} t_3 \quad (1)$$

式中: S 为调蓄湿地所涉及农田区域的面积; p 为农田区域降水强度; t_1 为农田区域降水历时; Q_{in} 为单位时间的农田灌溉水量; Q_{los} 为单位时间的农田区域水量损失; Q_{out} 为单位时间的农田区域外排水量; t_2 为农田灌溉时长; t_3 为超额降水外排历时。

1.1 降水强度

降水强度对农田灌溉影响最直接,能够显著影响农田水利工程提供的灌溉水量。降水量丰沛的地区,汛期时大气降水可有效作为灌溉水源;非汛期时可以通过农田灌溉系统的水循环调蓄工程,将雨季储存的水进行循环利用,减少农田灌溉新水量的需求,实现节约用水。对降水量缺乏的地方,有效地收集储存暴雨径流,减少降雨径流的外排损失,可实现水资源节约。另一方面,单位时间内的降水量越大,通过农田径流外排的水量损失越大,因此需要收集存蓄的水量越大,循环调蓄湿地体积需求也越大。

我国南方地区主要农作物水稻的生长期一般在4—10月^[17];在华北地区,作物一年两季,夏收小麦,秋收玉米,其主要的生长期和降水量较大的时期也在4—10月^[18]。因此,式(1)的降水强度可取当地每年4—10月的平均降水强度作为设计值。而在东北地区,作物一年一季,降量集中在7月、8月,因此东北地区在设计循环调蓄湿地时降雨强度可根据7—8月的平均降水强度进行计算。

1.2 净灌溉流量

循环调蓄湿地所涉及区域的农田净灌溉流量($Q_{in} - Q_{los}$)一般是综合考虑农田作物生长期需水量、区域降水量、蒸发量、渗漏及地下水补给等因素确定,可通过农作物灌溉净需水量 $W_{净}$ 来获得。

$W_{净}$ 主要与农作物种类、作物生长期、区域蒸发量、土壤渗漏量密切相关,同时也与作物的灌溉制度有关^[17]。如稻田灌溉需水量的确定,需考虑泡田、返青期、分蘖期、晒田、拔节期、乳熟期、黄熟期7个生长期对淹水层和淹水时长的要求,即根据不同时期灌水定额进行计算。 $W_{净}$ 可根据作物的灌溉面积和灌水定额计算^[19]:

$$W_{净} = mS \quad (2)$$

式中 m 为该作物灌水定额。

农田的净灌溉需水流量计算公式为

$$Q_{in} - Q_{los} = W_{净} / t_2 \quad (3)$$

1.3 外排水量

外排水量 Q_{out} 是指循环调蓄湿地所涉及农田区域的单位时间外排水量,与降水量、灌水量、渗漏量、蒸发量和调蓄湿地储存水量的水量平衡直接相关。另外,因为水稻各生长期需要的淹水层厚度不同,因此稻田的外排流量在计算时需考虑不同作物生长期需要保持的淹水层厚度及淹水时长。一般循环调蓄湿地的外排流量与调蓄湿地的储水能力呈负相关,估算中可以通过试算确定。

1.4 调蓄湿地水力停留时间

调蓄湿地水力停留时间 t 的取值与水池中储存的水量大小和水质净化及保持所需要的时间密切相关。同时, t 与调蓄湿地构筑物的设计形状有关,如水面面积与水深的比例大小影响着水体的溶解氧条件和氧化还原环境,对水质的保持和变化也有重要影响。实际上,在调蓄湿地应用时,为保持水体水质,设计时应根据水体水质条件,因地制宜地规划采用不同类型组合的人工强化净化等技术对污染物进行去除。

1.5 调蓄湿地水面面积

调蓄湿地水面面积 A 主要受农田区域土地利用紧张度限制,过大的面积会占用紧缺的农田土地,影响作物产量和农民的收入。因此,在确定调蓄湿地水面面积时,需要将储水水量最大、水质良好保持、土地利用效益等因素综合考虑,设计时需寻求最优。

2 水循环利用系统构建

农田灌溉水循环利用系统(图1)主要包括水循环动力系统、循环调蓄湿地系统、形态、体积及循环水量设计、调蓄湿地水质净化与保持、循环回用水配水系统等。

2.1 水循环动力系统

农田灌溉的水循环动力系统,其规划设计与农田区域的地形地势密切相关。一般在地势平坦的平原地区和地势低洼的南方圩区,水循环调蓄湿地中收集的水体需进行再次泵站提升后再输送到灌溉渠道,再次进入农田灌溉的系统中。而在有一定坡度的丘陵地区和梯田区,收集储存的雨水和退水,可借助地形高差,向下级渠道自流进行灌溉补充利用。

2.2 水循环调蓄湿地设计

调蓄湿地设计包括调蓄湿地形态、体积、循环水量确定等方面。设计时主要应考虑以下方面:①当现状条件下农田区域已存在一定面积的自然坑塘洼地时,尽可能地有效利用现有的洼地,因地制宜地进行调蓄湿地容积的核算、水面面积和平面形态的确定;同时在水质净化和保持时,保留现有洼地的自然水面,并应用人工湿地中潜流湿地的设计原理和方法,对调蓄湿地的进水和出水进行规划。②对没有坑塘洼地的农田区域,根据式(1)估算调蓄湿地体积,并根据人工湿地中的潜流湿地进行平面和形态设计,最后依据田块具体条件对调蓄湿地进出水进行设计。③对于用地比较紧张,或者冬季温度较低的北方地区,可采取挖深方式,形成地下储水与地面养水的结合,使大部分水储存在地表以下,不仅可以实现节水,还能减少对农田的占用。

水循环调蓄湿地体积和循环水量的设计依据式(1)确定,其调蓄湿地形态则依据当地的地势地形、土壤特性、田块形状及进出水位置因地制宜地进行规划设计。例如,在毗邻河流的农田中,可借助临河的自然坑塘,构建水生植物和多级透水丁坝组合的长条形净污湿地^[20-21]。在一些城市近郊的农田区域,也可采用人工湿地进行退水的水质净化和保持^[22-24]。

2.3 调蓄湿地水质净化与保持

调蓄湿地收集的水体,除大气降水外,灌溉后的农田退水中含有大量未被农作物吸收的氮磷营养元素和除草剂、杀虫剂等污染物,这些物质在调蓄湿地中如果停留时间过长,会引起水体富营养化和水质恶化,从而使灌溉水循环系统遭受破坏。常用的调蓄湿地水质净化技术包括净水基质、高效微生物筛选与附着、水生植物选配、调蓄湿地三维水动力微循环交换系统。

a. 净水基质的选用。依据人工湿地中各种基质材料的类型和特点进行净水基质的选用,如在氮磷的去除方面,沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附能力较强,红黏土、粉煤灰及活性炭对磷的吸附量较大,疏水性较高的有机磷农药容易被陶粒、砾石等基质吸附去除^[25]。生物炭与其他基质,如砾石、混凝土块等相比具有更强的污染物去除能力,Guo 等^[26]研究发现添加生物炭后可以显著提高化学需氧量和总氮的去除率。王沛芳等^[21]在农田面源净污湿地中对几种填料的渗滤坝开展了现场观测,发现自主研发的生态砌块对氨氮和磷的去除率分别可达 71.36% 和 86.10%, 优于火山岩、石灰石和砾石。

b. 高效微生物筛选与附着。微生物降解氮的主要机制是将水体中的氮经过硝化、反硝化、厌氧氨氧化

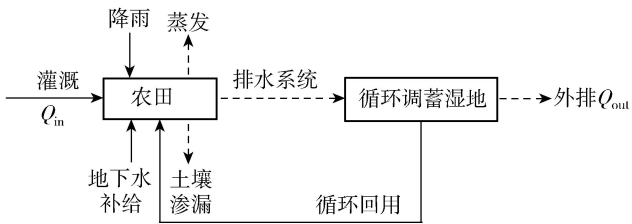


图1 农田灌溉水循环利用系统

Fig.1 Recycle system for irrigation water of farmland

等过程转化成气态氮进行去除。研究发现,人工湿地中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 可以通过反硝化等途径去除 60.0% ~ 95.0%^[27]。大部分 PPCPs 物质可以通过微生物降解作用去除,Blair 等^[28] 研究显示微生物经过共同代谢作用,将药物等有机物进行分解或部分转化去除;Wang 等^[29] 发现微生物可以将农药抗生素等视为碳源和能源将其完全矿物化。因此,通过驯化培养对目标污染物具有高效降解能力的微生物,并将其固定负载在调蓄湿地基质上,从而实现对循环水体中过量污染物的净化和水质保持。

c. 水生植物选配。常用于调蓄湿地系统的水生植物包括挺水植物,如芦苇、菖蒲、水葱等;浮叶植物,如凤眼莲、浮莲等;沉水植物,如金鱼藻、轮叶黑藻、马来眼子菜等。一般在半自然半人工的湿地系统中,这3种植物的植物都有应用,而在以基质为主的人工湿地中,挺水植物应用较多。Qian 等^[30] 在无锡古市桥港滨水湿地的现场研究发现,美人蕉、菖蒲和芦苇在对无机氮的吸收去除中发挥着重要作用,尤其是芦苇对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除作用更为明显。Licata 等^[31] 发现芦苇、风车草、香蒲的混合种植比单独种植更为有效。湿地植物对亲脂性农药(如毒死蜱)和硫磷等有较强的吸收能力^[32],同时甲基对硫磷和谷硫磷等具有极性的农药还可以通过植物的蒸腾作用进行去除^[33]。由此,可根据农田排水的水质条件及污染物类型科学选取和配置水生植物。

d. 调蓄湿地三维水动力微循环交换系统。在调蓄湿地水体净化关键技术中,除了基质吸附、微生物降解和植物吸收去除,水池中上层水体和下层水体,中间区和四周区水体的全面交换净化,也是影响整个水池水质的重要因素。因此,借助风光电一体化驱动的微气泡强化溶氧的微循环交换系统,实现整个水池容积水质的净化与保持,是近年来被广泛关注的技术之一^[34-35]。该系统可以在实现污染水体局部溶解氧强化提升的同时,改善水池不同深度和区域水体的水动力条件,达到整个水池水质的高效改善。另外,也有其他类型的技术应用于水动力微循环和水质净化的耦合,如课题组研发的水景观浮岛和浮床^[36-38],浮床植物可以吸收过量的营养物质和农药等污染物,植物根系的微生物可对污染物进行降解去除,同时通过太阳能提供动力,实现调蓄湿地水体垂向交换,从而达到整个水池水质的保持和改善。

2.4 循环水配置系统

调蓄湿地一般位于农田中地势较低的区域,以利于通过自流进行径流水体的收集蓄纳。因此,一般农田灌溉水循环利用系统需设计循环水配置系统。该系统主要构筑物包括调节池、进水口、水泵、回灌渠道系统。其中调节池体积和水泵选择均由设计的循环水流量估算和选取,回灌系统通常与现有灌溉渠道和排水沟道结合,或采用移动式地龙将循环水输送到渠首进行利用。另外,对于地形有统一坡度的农田区域,也可利用自然水头将循环水配送给下级田块进行回用。

3 农田灌溉水循环利用系统构建实例

上海市崇明区三星镇玉海棠生态农业园区,位于上海市崇明区的三星镇,是一座以农业为主,集农田、果园、林地和湖塘养殖一体的生态农业园区,示范区水稻田占地面积 13 hm²。近年来,崇明岛在国家长三角一体化发展战略指导下着力建设生态崇明岛,但由于农田退水的面源污染导致区域河流水质劣 V 类,损坏了生态系统健康。为此,该生态产业园规划建设的首要任务是节水减污和生态保护。具体措施包括节水减排、节肥减污和水循环利用。

水循环利用系统构建时需要根据崇明当地的气候特征、降水条件、土壤特性及水稻灌溉排水要求等计算水循环调蓄湿地的体积。设计概况如下:①确定调蓄湿地体积 V 。为充分考虑水资源和肥力的节约利用,调蓄湿地的设计原则是在非降雨期能最大限度地利用农田排水进行循环回灌,因此调蓄湿地体积按照全部承纳农田灌溉量进行设计。依据式(1)得到循环调蓄湿地体积为 31 199.8 m³。其中, m 取值根据上海市水稻的灌水率和灌溉定额泡田期定额 1 200.0 m³/hm²,一般农田灌溉时间为 3 d,即 $t_2 = 3 \text{ d}$;②湿地外排水量的设计。当降雨强度 p 与降雨历时 t_1 及农田面积 S 之积大于农田作物需水量和调蓄湿地所承纳的水量时,即开启泵站将涝水外排,因此, Q_{out} 由降水量(上海市崇明区多年平均降水量约为 1 049.3 mm)、作物需水量和调蓄湿地调节体积共同决定。③调蓄湿地形态设计。根据当地原有坑塘面积,并考虑地形条件和土壤特性,取水深为 3 m,计算调蓄湿地水面面积 A 为 1.04 hm²。经核算,上述水循环调蓄湿地水面面积占示范区农田面积的 8.0%,其比例略高于与国内湿地面积比例值的范围(5% ~ 7%),但略低于国外农田缓冲带的面积比例(10% ~ 15%)。这与上海温暖湿润的气候特征及崇明岛长江三角洲的地理位置相适应。该水循环系统运行至今,每年进行水量循环使用 3 次,每次回用水量占总体积的 20% ~ 30%,共节约灌溉水量 6 239.9 ~

9359.9 m³,有效节约了水资源并减轻了农田面源对长江口的水环境的富营养化压力。

4 结 语

农田灌溉水循环利用系统的实施可以有效促进农田水资源的节约,同时支撑农田退水水肥近零排放与低碳发展的战略目标。本文给出了水循环回用的湿地调蓄湿地体积估算方法及关键影响因素,阐释了各主要因子的取值依据和优化途径;给出了农田灌溉水循环利用系统的构建技术,并通过实例计算了上海崇明水稻田循环湿地的体积,为我国农田灌排系统水资源高效节约和肥力综合利用提供了新思路和新方法,为我国乡村振兴和生态文明发展战略提供技术支持。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2020)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021.

[2] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2019)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[3] 艾丽坤. 提高灌溉水利用系数,保障国家粮食安全与水安全[J]. 水资源保护,2012,28(3):82-87. (AI Likun. Improving irrigation water use coefficient and ensuring national food and water safety[J]. Water Resource Protection,2012,28(3):82-87. (in Chinese))

[4] 谢崇宝,张国华. 灌溉现代化核心内涵及水管理关键技术[J]. 中国农村水利水电,2017(7):28-32. (XIE Chongbao, ZHANG Guohua. Core connotation of irrigation modernization and key technology of water management[J]. China Rural Water and Hydropower,2017(7):28-32. (in Chinese))

[5] 张璇,胡宝贵. 中国农业节水灌溉技术推广研究进展[J]. 中国农学通报,2016,32(17):181-186. (ZHANG Xuan, HU Baogui. Research progress of popularization and application of agricultural water-saving irrigation techniques [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016,32(17):181-186. (in Chinese))

[6] 陈东,银永安,王永强,等. 中国农业节水灌溉技术现状及其发展对策[J]. 作物研究,2018,32(4):330-333. (CHEN Dong, YIN Yongan, WANG Yongqiang, et al. Current situation and development countermeasures of agricultural water -saving irrigation technology in China[J]. Crop Research,2018,32(4):330-333. (in Chinese))

[7] 崔丙健,高峰,胡超,等. 非常规水资源农业利用现状及研究进展[J]. 灌溉排水学报,2019,38(7):60-68. (CUI Bingjian, GAO Feng, HU Chao, et al. Present situation and research progress of agricultural utilization of unconventional water resources [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2019,38(7):60-68. (in Chinese))

[8] 郝凯越,李松旌,陈相宇,等. 再生水滴灌研究现状与发展概述[J]. 节水灌溉,2020(10):85-90. (HAO Kaiyue, LI Songjing, CHEN Xiangyu, et al. Overview of research status and development of reclaimed water drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(10):85-90. (in Chinese))

[9] 王锦国,刘子辉,李伟健. 污水灌溉区土壤非饱和带氮分布特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):377-383. (WANG Jinguo, LIU Zihui, LI Weijian. Distribution characteristics of nitrogen in the unsaturated soil of sewage irrigation area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(5):377-383. (in Chinese))

[10] 王沛芳,王超,徐海波. 自然水塘湿地系统对农业非点源氮的净化截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(3):782-785. (WANG Peifang, WANG Chao, XU Haibo. Effectiveness of nutrient retention and purification in natural ponds[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006,25(3):782-785. (in Chinese))

[11] 孙亚亚,俞双恩,陈军,等. 暴雨条件下不同灌排模式稻田排水中氮磷变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(5):455-459. (SUN Yaya, YU Shuang'en, CHEN Jun, et al. Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014,42(5):455-459. (in Chinese))

[12] MORENO-MATEOS D, MANDER U, COMIN F A, et al. Relationships between landscape pattern, wetland characteristics, and water quality in agricultural catchments[J]. Journal of Environmental Quality,2008,37(6):2170-2180.

[13] VERHOEVEN J, ARHEIMER B, YIN Chengqing, et al. Regional and global concerns over wetlands and water quality[J]. Trends in Ecology & Evolution,2006,21(2):96-103.

[14] 李耀国,刘劲. 农田景观设计与非点源污染控制[J]. 山西林业科技,2008(3):34-36. (LI Yaoguo, LIU Jin. Farmland landscape design and non-point source pollution control [J]. Shanxi Forestry Science and Technology,2008(3):34-36. (in Chinese))

[15] 刘笑吟,徐俊增,杨士红,等. 节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素[J]. 水资源保护,2018,34(2):42-51. (LIU Xiaoyin, XU Junzeng, YANG Shihong, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):42-51. (in Chinese))

[16] 邵孝候,张宇杰,常婷婷,等. 生物有机肥对盐渍土壤水盐动态及番茄产量的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),

- 2018,46(2):153-160. (SHAO Xiaohou,ZHANG Yujie,CHANG Tingting, et al. Effects of different fertilizer treatments on soil water, salt and crop yield formation in saline soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(2):153-160. (in Chinese))
- [17] 蒋敏,李秀彬,辛良杰,等. 南方水稻复种指数变化对国家粮食产能的影响及其政策启示[J]. 地理学报,2019,74(1):32-43. (JIANG Min,LI Xiubin,XIN Liangjie, et al. Paddy rice multiple cropping index changes in Southern China: Impacts on national grain production capacity and policy implications[J]. Journal of Geographical Sciences,2019,74(1):32-43. (in Chinese))
- [18] 艾海舰,李志熙,边利军. 春小麦与玉米、向日葵间作套种对土壤水分的影响[J]. 水土保持通报,2014,34(4):91-98. (AI Haijian,LI Zhixi,BIAN Lijun. Effects of spring wheat/maize, spring wheat/sunflower intercropping on soil moisture[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2014,34(4):91-98. (in Chinese))
- [19] 王春堂. 农田水利学/普通高等教育“十二五”规划教材[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [20] 曹丹,易秀,陈小兵. 基于农业灌溉需水量计算的黄河三角洲作物结构优化[J]. 水资源保护,2022,38(2):154-159. (CAO Dan, YI Xiu, CHEN Xiaobing. Crop structure optimization based on agricultural irrigation water demand calculation in the Yellow River Delta[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):154-159. (in Chinese))
- [21] 王沛芳,娄明月,钱进,等. 农田退水净污湿地对污染物的净化效果及机理分析[J]. 水资源保护,2020,36(5):1-10. (WANG Peifang, LOU Mingyue, QIAN Jin, et al. Analysis of purification effect and mechanism of pollutant by the farmland drainage wetland[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):1-10. (in Chinese))
- [22] 李本行,李增辉,曲丹,等. “生态沟渠+人工湿地”系统处理农田退水中噻虫嗪[J]. 环境工程学报,2017,11(12):6532-6539. (LI Benxing, LI Zenghui, QU Dan, et al. Ecological ditches and constructed wetland system processing thiamethoxam on farmland drainage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(12):6532-6539. (in Chinese))
- [23] WANG Mo, ZHANG Dongqing, DONG Jianwen, et al. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review[J]. Hydrobiologia, 2018,805(1):1-31.
- [24] 常洋,王彤,王海燕,等. 芦苇碳源-表面流人工湿地对农田退水脱氮的长期效能研究[J]. 环境工程技术学报, 2016,6(5):453-461. (CHANG Yang, WANG Tong, WANG Haiyan, et al. The long-term nitrogen removal efficiency from agricultural runoff in phragmites australis packed surface flow constructed wetland[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016,6(5):453-461. (in Chinese))
- [25] TANG X, YANG Y, RAN T, et al. Fate of mixed pesticides in an integrated recirculating constructed wetland (IRCW) [J]. Science of the Total Environment, 2016, 571(15): 935-942.
- [26] GUO Fucheng, ZHANG Junmao, YANG Xiangyu, et al. Impact of biochar on greenhouse gas emissions from constructed wetlands under various influent chemical oxygen demand to nitrogen ratios[J]. Bioresource Technology, 2020,303:122908.
- [27] XU Dan, XIAO Enrong, XU Peng, et al. Performance and microbial communities of completely autotrophic denitrification in a bioelectrochemically-assisted constructed wetland system for nitrate removal[J]. Bioresource Technology,2017,228:39-46.
- [28] BLAIR B, NIKOLAUS A, HEDMAN C, et al. Evaluating the degradation, sorption, and negative mass balances of pharmaceuticals and personal care products during wastewater treatment [J]. Chemosphere, 2015,134:395-401.
- [29] WANG Mo,ZHANG Dongqing, DONG Jianwen,et al. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review[J]. Hydrobiologia, 2017,805:1-31.
- [30] QIAN Jin,JIN Wen,HU Jing,et al. Stable isotope analyses of nitrogen source and preference for ammonium versus nitrate of riparian plants during the plant growing season in Taihu Lake Basin[J]. Science of the Total Environment,2020,763:143029.
- [31] LICATA M, GENNARO M C, TUTTOLOMONDO T, et al. Research focusing on plant performance in constructed wetlands and agronomic application of treated wastewater-a set of experimental studies in Sicily (Italy) [J]. PloS One,2019,14(7):300-310.
- [32] BRIGGS G G, BROMILOW R H, EVANS A A, et al. Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionised chemicals by barley [J]. Pesticide Science, 1982, 13(5): 495-504.
- [33] SALT D E, SMITH R D, RASKIN I. Phytoremediation[J]. Annual Review of Plant Biology,1998,49(1):643-668.
- [34] 左倬,陈煜权,卿杰,等. 微气泡曝气技术对微污染水体增氧效果的中试研究[J]. 环境工程,2016,34(5):11-14. (ZUO Zhuo,CHEN Yuquan, QING Jie, et al. A pilot-scale study on micro-polluted water aerobic effect bu micro-bubble aeration technology[J]. Environmental Engineering,2016,34(5):11-14. (in Chinese))
- [35] 张保君,曹蓉,叶春,等. 微纳米曝气对植物浮床净化水质效果影响及数学模型分析[J]. 水处理技术,2012,38(7):53-57. (ZHANG Baojun,CAO Rong, YE Chun, et al. Effect of micro-nano aeration on water purification of plant floating bed and mathematical model analysis[J]. Technology of Water Treatment,2012,38(7):53-57. (in Chinese))
- [36] 钱进,王沛芳,侯俊,等. 南方冬季静水河湖应急高效生态浮床及成形方法:103288221[P]. 2014-06-11.
- [37] 王沛芳,饶磊,钱进,等. 一种适用于静水湖泊的底置式光催化浮岛:105417849 [P]. 2017-09-22.
- [38] 饶磊,王沛芳,任凌霄. 一种适用于静水湖泊的雨淋式高效生态浮床:103896458[P]. 2015-04-01.