

徐云强, 苏保林, 王红旗, 等. 太湖流域直播水稻田水量平衡分析与径流污染负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 892–902.

XU Yun-qiang, SU Bao-lin, WANG Hong-qi, et al. Analysis of water balance and runoff pollution in a paddy field with direct seeding cultivation in-situ in the Taihu Lake Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 892–902.

太湖流域直播水稻田水量平衡分析与径流污染负荷研究

徐云强¹, 苏保林^{1*}, 王红旗¹, 乔飞^{2*}, 雷坤², 何璟嫻¹, 李丽芬¹

(1. 北京师范大学水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:为准确、方便地分析水稻田水量平衡关系及研究水稻田非点源污染负荷, 本文采用基于降雨-水位原位观测方法(方法一)和基于降雨-水位的灌溉、产流识别方法(方法二)对太湖流域直播试验水稻田进行水量平衡分析和径流污染负荷计算。通过水稻田水位变化数据计算得到水稻田生长季总蒸散发和渗漏损失为 1 087.2 mm。根据水量平衡原理, 方法一、方法二计算的水量亏损值分别为 18.1、81.8 mm, 分别占入流总量的 1.4% 和 6.0%, 方法一在试验点水稻田水量平衡分析中更准确。应用方法一计算得到水稻田灌溉水量为 866.9 mm, 入流总量为 1 330.6 mm, 径流总量为 303.2 mm。两种方法计算的灌溉水量相近, 方法二可用于灌溉水量的对比分析。水稻田径流污染负荷计算中, 应用方法一计算得到 TN、TP 输出系数为 9.18、0.45 kg·hm⁻², 在合理的范围内。应用方法一进行水稻田水量平衡分析和非点源污染负荷核算具有较好的准确性和适应性。

关键词:水稻田; 蒸散发和渗漏损失; 水量平衡; 径流污染; 输出系数

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)04-0892-11 doi:10.11654/jaes.2018-0845

Analysis of water balance and runoff pollution in a paddy field with direct seeding cultivation in-situ in the Taihu Lake Basin, China

XU Yun-qiang¹, SU Bao-lin^{1*}, WANG Hong-qi¹, QIAO Fei^{2*}, LEI Kun², HE Jing-yi¹, LI Li-fen¹

(1.1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to accurately and conveniently analyze water balance and non-point source pollution in paddy fields, two research methods were implemented in the experimental paddy field with direct seeding cultivation in the Taihu Lake Basin. The two methods were the “in-situ method based on synchronous observation of precipitation and water depth” (method one) and “identification method of irrigation and runoff based on synchronous observation of precipitation and water depth” (method two). The results obtained were as follows. The total evapotranspiration and infiltration ($E+F$) loss from the field during the growing period of paddy was 1 087.2 mm, based on the water depth variation data. According to the principle of water balance, the water deficits calculated by methods one and two were 18.1 mm and 81.8 mm, which accounted for 1.4% and 6.0% of the total inflow volume, respectively. Method one was more accurate for water balance analysis. The irrigation volume of the paddy field calculated by method one was 866.9 mm, the total inflow volume was 1 330.6 mm, and the total runoff volume was 303.2 mm. The irrigation volume calculated by method two could be used for comparison with method one. The export coefficients of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) calculated by method one were 9.18 kg·hm⁻² and 0.45 kg·hm⁻², respectively, which were within a reasonable range. This indicated that method one could be applied for accurate and reliable water balance and non-point source pollution analyses in paddy fields.

Keywords: paddy field; evapotranspiration and infiltration; water balance; runoff pollution; export coefficient

收稿日期: 2018-06-30 录用日期: 2018-10-16

作者简介: 徐云强(1988—), 男, 山东沂水人, 博士生, 主要从事非点源污染及水质模拟研究。E-mail: xyqbeij@163.com

*通信作者: 苏保林 E-mail: subl@bnu.edu.cn 乔飞 E-mail: qiaofei@craes.org.cn

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301-003); 国家自然科学基金项目(41772234)

Project supported: The National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Project (2017ZX07301-003); The National Natural Science Foundation of China (41772234)

我国非点源污染引发严重的环境问题,且随着我国点源污染的治理进程的逐步进行,非点源污染引起的水环境问题日益凸显^[1-3]。近年来,越来越多的观点认为,非点源污染尤其是农业非点源污染,是我国水质管理中的关键^[4-6]。从流域层面来看,在太湖、巢湖和滇池等流域,至少50%的水体污染负荷由非点源贡献^[7]。2007年太湖蓝藻污染事件让太湖的生态环境问题成为世界关注的问题^[8],对太湖水质进行治理的2007至2016十年间,太湖平均营养指数为60.8~62.3,太湖水质始终以中度富营养水平为主^[9],未得到根本改善,做好太湖治污、防污工作仍旧任重道远。太湖地区作为我国重要的粮食生产基地之一,主要采用稻麦轮作双季种植模式,进行集约化农业生产,主要特点是高投入、高产量^[10]。太湖流域农田肥料年用量平均为氮肥570~600 kg·hm⁻²,磷肥79.5~99 kg·hm⁻²,化肥平均利用率仅为30%~35%^[11-12]。过量的化肥施用增加了农业生产成本和农业经济投入,容易使得土壤中氮磷等营养物质大量流失,造成地表水污染、水体富营养化、地下水污染和非点源污染等一系列环境问题^[13-16],并会增加农田土壤温室气体排放^[17]。水稻是太湖流域的主要种植作物,水稻生长期通常保持田面蓄水,水稻田由降雨产流或者人工管理措施排水造成的农业非点源污染不容忽视。

试验点水稻田水量平衡的研究方法主要有径流池法、同步观测法和基于降雨-水位同步观测的水稻田原位观测方法。径流池法和同步观测法在稻田水量平衡分析和非点源污染负荷计算中已有大量应用^[18-19],但径流池法适用于具有单一出水口的稻田,且需要建造径流池,同步观测法要求水稻田的出水口固定且唯一,多用于试验站的观测,对于野外具有多出水口的实际水稻田,两个方法均有很大的局限性^[20]。基于降雨-水位同步观测的水稻田原位观测方法^[20-22],在不改变野外水稻田原有出流特征和农业管理措施的前提下,现场观测计算水稻田径流污染流失情况。同时,基于降雨、水位可对水稻田的灌溉、产流进行识别。因此,本研究在试验点水稻田采集降雨、水位、水质同步观测数据,采用基于降雨-水位原位观测方法(方法一)和基于降雨-水位的灌溉、产流识别方法(方法二)对水稻田分别进行水量平衡分析和径流污染负荷计算,得到两种计算方法的水稻田灌溉水量、径流量及径流污染输出系数,对两种方法计算结果进行对比分析并相互验证,以得到计算水稻田水量平衡和径流污染负荷的准确方法,为准确、方便

计算出水口不固定实际水稻田的径流污染负荷提供依据和数据支持,并以期科学指导水稻田水肥管理。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

宜兴地处江苏省南端、长江下游南岸,太湖流域湖西区水网平原,属于北亚热带南部季风气候,多年平均降雨量为1197 mm,多年平均气温为15.6℃。殷村港长20.3 km,河道断面平均宽45 m,属于洮、涪、太水系,西起涪湖,在竺山汇入太湖,是为了泄洪而开挖的人工运河,年平均径流总量达11亿m³,是太湖西岸主要入湖河流之一^[23-25]。2003—2007年,江苏省15条太湖入湖河流中,殷村港污染物排放量最大,其NH₄⁺-N、TN和TP的入湖量分别占江苏环湖入湖污染物量的20.1%、17.8%和19.7%^[26]。

试验点水稻田为江苏省宜兴市的野外水稻田,位于殷村港入太湖下游的周铁镇,地理位置见图1。水稻田采用直播水稻方式,灌溉模式为间歇灌溉,属于干湿交替节水灌溉模式,水稻田一次灌水后,田面水水层变浅至低水位甚至到无水状态后,再进行下一次灌溉,在保证水稻生长的同时,周期循环灌溉,灌溉周期为5~7 d左右。试验点水稻田水位变化过程线及水稻生长期划分见图2。

试验田基本管理措施为,在6月上旬播种,10月末收割,水稻生长期近150 d。现场监测时间为2017/06/26至2017/10/14,计111 d,其中06/26至07/02为幼苗期,07/03至07/31为分蘖期,08/01至09/13为拔节孕穗期(其中09/06—09/13为抽穗扬花期),09/14至10/14为成熟期。水稻田底肥施用复合肥(16%、16%、16%)30 kg,分蘖初期施用尿素追肥12.5 kg,拔节孕穗期初期施用穗肥复合肥(16%、0%、12%)30 kg。

1.2 数据收集

水稻生长期采集水稻田水位信息和降雨信息。试验点水稻田块较平整,在试验田进水口一侧靠近田埂处安装L99-WL水位记录仪,仪器探头距离底部淤泥约20 mm处,定期检测以防止探头被阻塞而影响记录,水位计高度在整个水稻生长监测期内位置不变,设定仪器记录间隔为30 min。在试验田附近按要求安装L99-YL雨量记录仪1台,采集降雨过程数据,设定仪器记录间隔为10 min。

水稻监测期内,在试验点水稻田距离水位记录仪1 m左右定点采集水样,每周定期采样2次,水样采集后

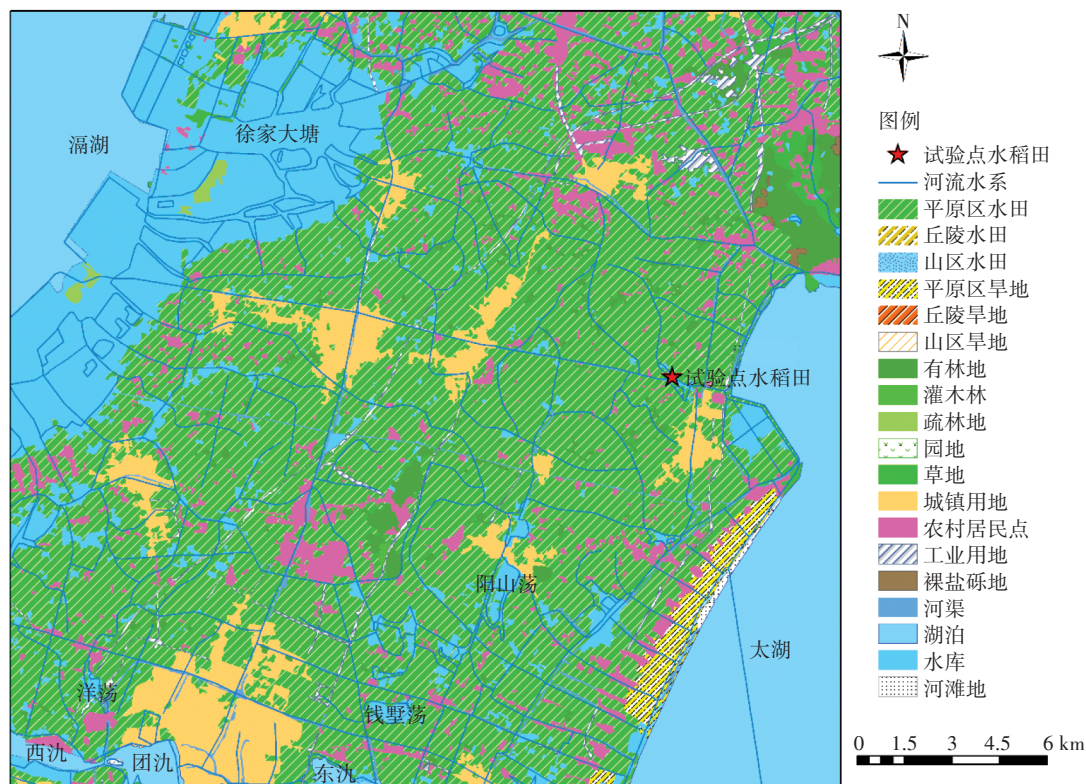


图1 试验点水稻田地理位置

Figure 1 Geographic position of the study paddy field

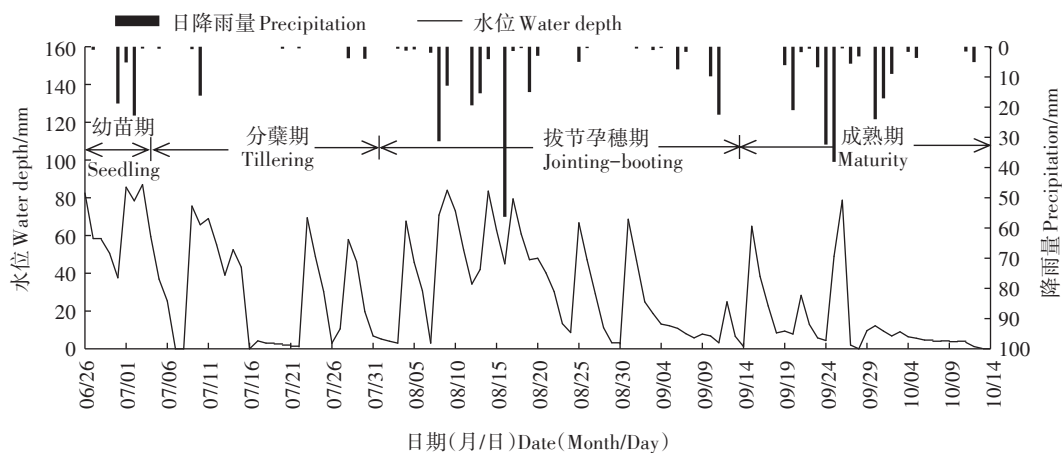


图2 水稻田生长期划分、水位变化过程线和降雨分布

Figure 2 Growing period division, water depth and precipitation hydrograph of the paddy field

运送至实验室进行检测。检测指标包括:TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD_{Mn} 。TN测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定采用水杨酸分光光度法, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测定采用酚二磺酸分光光度法,TP测定采用钼酸铵分光光度法, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用抗坏血酸还原-磷钼蓝比色法, COD_{Mn} 测定采用酸性高锰酸钾法。

1.3 水稻田水量平衡分析

1.3.1 基于降雨-水位原位观测方法

判断水稻田发生径流污染的前提是水稻田田面水发生出流,流出的田面水即会造成径流污染。水稻水量平衡的主要影响因素包括:降雨量、蒸散发渗漏损失、灌溉水量和径流量。水稻田水量变化通过水位变化体现,我们可以建立水稻田水量平衡公式,如

式(1)^[27]:

$$\Delta H = P + R_{in} - (E + F) - R_{out} \quad (1)$$

式中: ΔH 为水稻田水位变化量,mm; P 为日降雨量,mm; R_{in} 为水稻田人工灌溉水量,mm; $(E+F)$ 为蒸散发和渗漏损失量,mm; R_{out} 为水稻田出流量,mm。

根据水量平衡公式(1),通过降雨量、田面水水位、蒸散发和渗漏损失量计算前后两日水位变化量,由此判断径流量,如式(2)^[20,22]:

$$\begin{cases} \Delta R_i = P_i - (E_i + F_i) - (H_{i+1} - H_i) \\ \Delta R_i > 0, R_{out,i} = \Delta R_i \\ \Delta R_i < 0, R_{in,i} = -\Delta R_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_i 为第*i*日降雨量,mm; (E_i+F_i) 为第*i*日蒸散发和渗漏损失量,mm; H_i 为第*i*日水稻田水位,mm; H_{i+1} 为第*i+1*日水稻田水位,mm; ΔR_i 为水稻田第*i*日的农田进水量和出水量之差,mm; $R_{out,i}$ 为水稻田第*i*日的农田出水量,mm; $R_{in,i}$ 为水稻田第*i*日的农田进水量,mm。

$\Sigma R_{out,i}$ 为水稻田生长季的径流总量,mm; $\Sigma R_{in,i}$ 为水稻田生长季总灌溉水量,mm。

1.3.2 基于降雨-水位的灌溉、产流识别方法

水稻田水量变化包括入流量和消耗水量,水稻田入流量包括自然降雨和人工灌溉,水稻田消耗水量包括蒸散发渗漏损失量和径流量,径流量包括人工排水产流量、降雨产流量和回归流产流量。

(1) 水稻田入流量

水稻田进水量主要包括人工灌溉和降雨,降雨量可通过雨量计测量得到, ΣP_i 为水稻田生长季的总降雨量。人工灌溉水稻田时,水位过程线会出现明显的上升拐点,灌溉结束时达到此次最高灌溉水位,之后水位逐步下降,典型的水稻田人工灌溉水位变化过程线见图3,人工灌溉前后水位差即为人工灌溉水量,见公式(3):

$$I_i = H_p - H_q \quad (3)$$

式中, H_p 为人工灌溉结束时刻最高水位,mm; H_q 为人工灌溉开始时刻前水位,mm; I_i 为此次人工灌溉水量,mm。

ΣI_i 为水稻田生长季的总人工灌溉水量,mm。

(2) 水稻田径流量

水稻田产流主要包括人工排水、降雨产流和灌溉回归流。水稻不同生长时期对水位有不同要求,如果水稻田内水位过深,需要进行适当的人工排水。人工排水时,水位过程线出现较明显的下降拐点,水位快速降低,见图4,人工排水前后水位差即为排水量,见

公式(4):

$$D_j = H_m - H_n \quad (4)$$

式中: H_m 为人工排水开始时刻水位,mm; H_n 为人工排水结束时刻水位,mm; D_j 此次人工排水量,mm。

ΣD_j 为水稻田生长季的总人工排水水量,mm。

最低田埂高度是决定水稻田是否产流的重要指标,可通过水稻田水位和最低田埂的差值计算水稻田产流量。降雨时,水位过程线呈上升趋势,如果降雨量过大,则水稻田内水位超过最低田埂高度发生溢流现象,造成径流污染,典型降雨时水位变化过程线如图5。当水稻田水位达到最低田埂高度产流后,如果降雨持续,则水稻田水位基本维持在最低田埂高度的深度,由此可判断水稻田最低田埂高度(H_l),见图5。水稻田水位升高达到最低田埂高度时刻起,至水稻田水位降低到最低田埂高度时刻止,这段时间内的降雨为降雨产流,见公式(5):

$$\Delta R_k = P_k + P_{k+1} + \dots + P_z \quad (5)$$

式中: ΔR_k 为场次降雨的降雨产流量,mm; P_k 为场次降

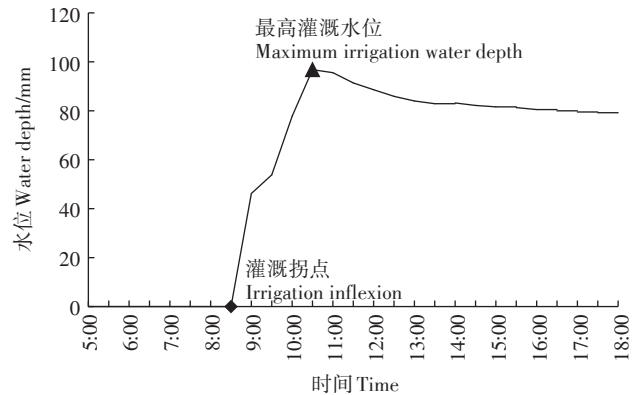


图3 人工灌溉时水位变化

Figure 3 Water depth hydrograph with an artificial irrigation

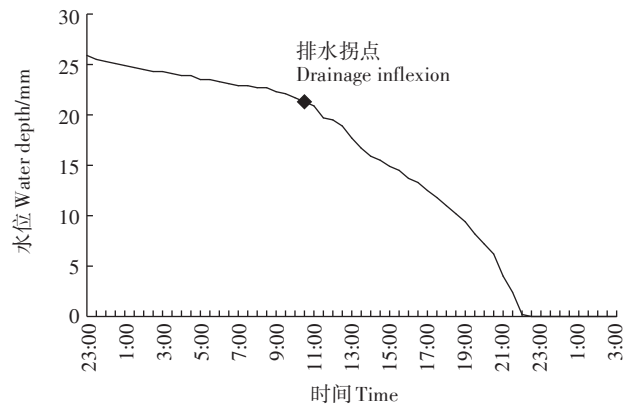


图4 人工排水时水位变化过程线

Figure 4 Water depth hydrograph with an artificial drainage

雨中水稻田水位升高达到最低田埂高度时刻降雨量, mm; P_{k+1} 为场次降雨中水稻田水位升高至最低田埂高度后下一时刻降雨量, mm; P_z 为场次降雨中水稻田水位降低至最低田埂高度时刻降雨量, mm。

$\Sigma \Delta R_k$ 为水稻田生长季降雨产流场次的总降雨产流量。

人工灌溉时, 水稻田水位快速升高, 水位在开始灌溉时刻出现较明显的上升灌溉拐点, 逐渐至最高灌溉水位, 之后水位逐渐下降, 见图3。过量灌溉也可造成水稻田回归流产流, 即如果灌溉水量过大使田面水水位超过最低田埂高度, 发生溢流现象。灌溉过程中, 水稻田水位升高达到最低田埂高度时刻起, 至此次灌溉水稻田达到的最高水位时刻止, 此段时间内的灌溉水量为灌溉回归流产流, 见公式(6):

$$\Delta R_w = (H_x - H_i) + (H_{x+1} - H_i) + \dots + (H_y - H_i) \quad (6)$$

式中: ΔR_w 为场次灌溉时的回归流产流量, mm; H_x 为人工灌溉水稻田水位升高达到最低田埂高度时刻时水位, mm; H_y 为此次灌溉水稻田达到的最高水位, mm; H_i 为最低田埂高度, mm。

$\Sigma \Delta R_w$ 为水稻田生长季灌溉场次的总灌溉回归流产流量。

1.4 蒸散发渗漏损失分析

水稻生长季内记录的水位变化过程线能很好地反映试验水稻田的水量变化过程。根据水稻田水量平衡的主要影响因素, 在没有降雨和人工管理措施(人工灌溉和人工排水)干预的情况下, 水稻田水位变化仅由蒸散发和渗漏损失造成, 水位呈平稳下降趋势, 得到简化的水量平衡公式(7):

$$\Delta H = -(E + F) \quad (7)$$

因此, 可以选定这样的水位过程线拟合求解得到

1 d 或连续几天内的蒸散发渗漏损失量。在有降雨或者人工管理措施干预的时间段, 无法通过水位变化过程线拟合求解蒸散发和渗漏损失值。但水稻同一生长时间段内, 水稻生长状况近似, 且相同天气情况下, 蒸散发和渗漏损失值接近, 因此, 可以通过前后几日的蒸散发和渗漏损失量拟合求解得到。进而可求得水稻生长期总蒸散发渗漏损失量[总(E+F)]。

1.5 水稻田非点源污染负荷计算

试验点水稻田野外试验中, 很难实时检测每一场次径流时的污染物浓度, 因此通过定期采集水样测定水稻田污染物浓度的方法, 得到水稻生长季的污染物浓度变化过程线, 结合计算的水稻田产流情况, 如果产流当日进行水质检测, 则采用当日污染物浓度, 如果产流当日未采集水样, 则利用距离产流日最近的前后两次检测水质中间差值计算当日污染物浓度, 径流量与污染物浓度相乘计算得到污染物次径流的污染负荷, 进而求和得到水稻田生长季非点源污染的负荷量。场次产流污染负荷计算见公式(8):

$$L_i = \Delta R_i \times C_i \quad (8)$$

式中: L_i 为场次产流时的污染负荷, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; ΔR_i 为场次产流出水量, mm; C_i 为场次产流污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

ΣL_i 为水稻田生长季某种污染物质的总污染负荷量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2 结果与分析

2.1 水稻田蒸散发与渗漏损失

周铁镇水稻田现场监测 111 d, 选取水位稳定下降时间段拟合求解得到 38 d 的蒸散发和渗漏损失值, 其中, 幼苗期 5 d, 分蘖期 12 d, 拔节孕穗期 18 d, 成熟

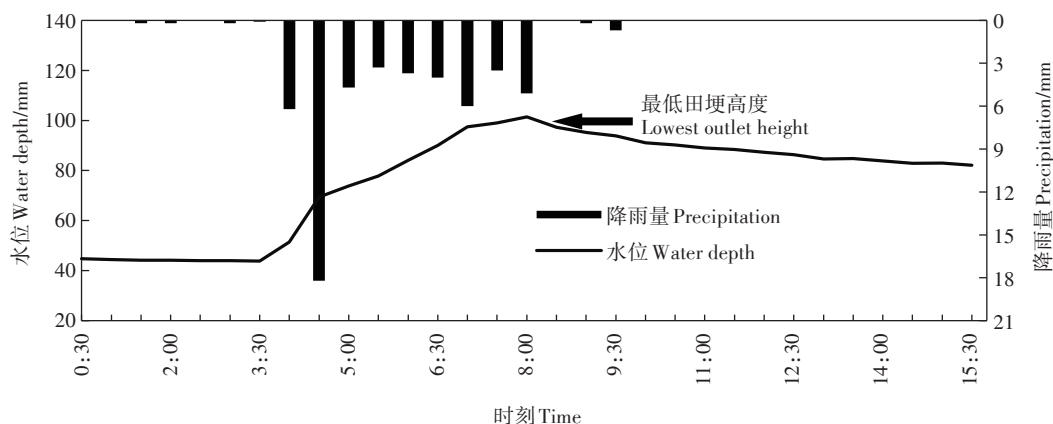


图5 降雨产流时水位变化过程线

Figure 5 Water depth hydrograph with a rainfall runoff

期3 d。根据水稻同一生长时期、相同天气情况前后几日的蒸散发和渗漏损失值,插值计算得到水稻生长季总($E+F$)为1087.2 mm,其中有水期总($E+F$)为1 045.5 mm,水稻田水位、蒸散发和渗漏损失量见图6。

2.2 水量平衡分析和径流计算

水稻田6月上旬播种至幼苗期之间为播种期,期间进行稻田泥浆化及稻田播种后灌溉,以保持田间湿润为主,田间不产生径流;10/14之后为水稻成熟期末期,不再进行灌溉,稻田内无水。水稻田监测时间为2017/06/26至2017/10/14,水量平衡分析未包括以上两个时期。

试验点水稻田分别于分蘖前期(07/06—07/08)、分蘖中期(07/15—07/22)和分蘖末期及拔节孕穗初期(07/30—08/03)进行了3次晒田,3次晒田时间分别为2 d、7 d和4 d,通过水稻田晒田,可达到控制水稻无效分蘖、巩固有效分蘖、增强水稻根系活力向下生长、抑制病虫害危害等作用,适度晒田配合适宜的穗肥施用还可以提高水稻的氮肥利用效率和产量^[28-29]。除3次晒田期、拔节孕穗期末期及大部分水稻成熟期稻田水位较低外,水稻田水位大部分时刻均保持在20 mm以上,采用两种方法分别进行水稻田水量平衡分析及径流统计。

2.2.1 方法一水量平衡分析

方法一计算试验点水稻田灌溉水量及日径流量见表1和表2,根据公式(2),得到水稻田生长季径流总量(包括降雨产流、人工排水和回归流)为303.2 mm,灌溉总水量为866.9 mm,生长期总降雨水量为463.7 mm,因此周铁镇试验点水稻田生长季入流总水量为1 330.6 mm。

2.2.2 方法二水量平衡分析

(1)水稻田入流水量

水稻田进水量主要包括自然降雨和人工灌溉,水稻生长季总降雨水量为463.7 mm。根据公式(3)得到水稻田灌溉情况见表3,水稻田生长季共灌溉12次,每次灌溉时间为1.5~4 h,平均灌溉时间为3.0 h,总灌溉水量为907.6 mm。因此,水稻田入流水量为1 371.3 mm。方法二与方法一识别的灌溉次数相差1

表1 方法一计算水稻田灌溉水量统计
Table 1 Statistics of irrigation volume of the paddy field with method one

日期 Date	水位/mm Water depth	日降雨量/mm Precipitation	灌溉水量/mm Runoff volume	备注 Remarks
2017/06/26	83.0	0	83.0*	一
2017/06/30	37.6	18.8	43.0	二
2017/07/08	0.0	0	86.2	三
2017/07/13	39.0	0	27.6	四
2017/07/22	1.0	0.2	82.1	五
2017/07/26	3.0	0	21.5	六
2017/07/27	10.6	0	61.2	
2017/08/03	3.0	0.3	79.8	七
2017/08/07	3.0	2.0	79.9	八
2017/08/13	42.0	15.4	41.6	九
2017/08/24	8.6	0	73.4	十
2017/08/30	2.6	0	81.3	十一
2017/09/14	1.2	0	79.0	十二
2017/09/24	4.4	32.4	27.5	十三
合计			866.9	13次

注:*第一次灌溉水量按照初始监测水位计。下同。
Note: * The first irrigation volume is based on the initial monitoring water depth. The same below.

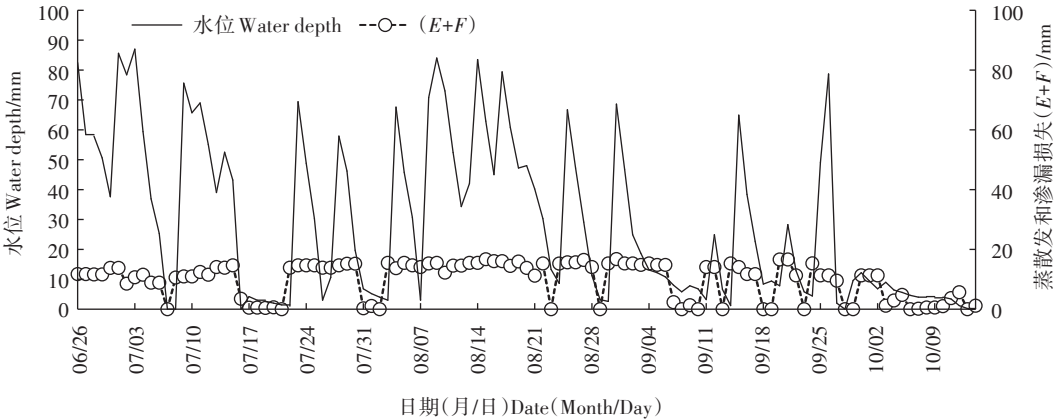


图6 水稻田水位、蒸散发和渗漏损失变化过程线

Figure 6 Water depth and evapotranspiration & infiltration hydrograph of the paddy field

表2 方法一计算水稻田径流量统计

Table 2 Statistics of runoff volume of the paddy field with method one

日期 Date	水位/mm Water depth	降雨量/mm Precipitation	(E+F)/ mm	径流量/mm Runoff volume	备注 Remarks
2017/06/26	82.9	0	11.7	8.3	一
2017/07/02	78.4	22.8	8.5	7.9	二
2017/07/03	84.7	0.6	10.7	13.4	
2017/07/04	61.3	0	11.5	12.3	
2017/07/05	37.4	0.3	8.9	3.4	
2017/07/06	25.4	0	8.9	11.5	
2017/07/15	43.0	0	14.7	22.1	三
2017/07/23	70.5	0	14.7	7.0	四
2017/07/24	48.8	0	14.7	2.8	
2017/07/25	31.3	0	14.7	4.3	
2017/07/28	60.1	3.8	14.7	13.5	五
2017/08/04	69.6	1.3	13.7	12.3	六
2017/08/08	79.0	31.3	15.3	14.9	七
2017/08/09	80.1	12.9	15.5	4.4	
2017/08/10	73.1	0	12.2	8.5	
2017/08/11	52.4	0	14.6	3.1	
2017/08/14	82.6	4.1	15.5	7.3	八
2017/08/16	60.9	56.3	16.1	21.8	九
2017/08/25	69.1	5.0	15.7	11.5	十
2017/08/31	71.3	0	16.7	7.4	十一
2017/09/01	47.2	0.6	15.3	6.6	
2017/09/15	68.8	0	14.1	14.8	十二
2017/09/16	39.9	0	11.7	3.9	
2017/09/26	74.7	0.2	11.3	59.0	十三
2017/09/30	13.4	24.0	11.3	16.2	十四
2017/10/01	10.0	17.1	11.3	5.0	
合计				303.2	14次

次,计算的灌溉水量相差4.5%,两种方法计算的灌溉水量可用于灌溉水量的对比分析。

(2)水稻田径流量

水稻田产流主要包括人工排水、降雨产流和灌溉回归流。根据公式(4)得到水稻田人工排水情况见表4,人工排水主要发生在幼苗期、分蘖期和成熟期,共计5次,人工排水总量为183.5 mm。分蘖末期及拔节孕穗期初期(07/30—08/03)4 d晒田期通过水位自然落干进行晒田,没有进行人工排水。06/26—07/02为幼苗期,要求田间有一定水位且水位不能太深(不能淹没幼苗),06/26灌溉时水位较高,06/30—07/02连续降雨使稻田水位较高,因此06/26、07/03分别进行了适当排水。

表3 方法二识别水稻田灌溉情况统计

Table 3 Statistics of irrigation volume of the paddy field with method two

序号 No.	日期 Date	灌溉历时/h Irrigation duration	灌溉水量/mm Irrigation volume
1	2017/06/26	—	83.0*
2	2017/06/30	2.5	41.8
3	2017/07/08	2.5	88.6
4	2017/07/13	2.5	38.8
5	2017/07/22	3.0	89.5
6	2017/07/27	4.0	72.0
7	2017/08/03	1.5	90.6
8	2017/08/07	2.5	81.6
9	2017/08/13	2.5	45.2
10	2017/08/24	4.0	87.9
11	2017/08/30	3.5	93.2
12	2017/09/14	4.0	95.3
合计		32.5	907.6

表4 水稻田人工排水情况统计

Table 4 Statistics of drainage volume of the paddy field

序号 No.	时间 Date	水稻生长时期 Growing stages of rice	排水量/mm Drainage volume
1	2017/06/26	幼苗期	20.8
2	2017/07/03	分蘖初期	39.7
3	2017/07/06	分蘖前期	22.2
4	2017/07/15	分蘖中期	31.4
5	2017/09/26	成熟期	69.4
合计			183.5

根据图5,得到水稻田最低田埂高度为97.5 mm。根据公式(4)得到水稻田降雨产流情况见表5,有2场次降雨发生降雨产流,主要为08/16暴雨发生降雨产流,降雨总产流量为16.5 mm。

过量灌溉时,会造成水稻田溢流(回归流),根据公式(6)得到水稻田灌溉回归流情况见表6,12场次灌溉中有5场次灌溉发生回归流产流,回归流总产流量为44.0 mm。回归流产流主要发生在拔节孕穗

表5 水稻田降雨产流情况统计

Table 5 Statistics of precipitation volume of the paddy field

序号 No.	日期 Date	场次降雨量/mm One precipitation	最低田埂高度/mm Lowest outlet height	降雨产流量/mm Rainfall runoff volume
1	2017/06/30	18.8	97.5	1.9
2	2017/08/16	56.3		14.6
合计				16.5

期后期(08/24、08/30)和成熟期(09/14),此3次灌溉水量较大,与水稻生长后期灌溉频率降低、灌溉水量增大有关,产生了大部分的回归流。

方法二计算得到水稻田生长季径流总量为244.0 mm。

2.2.3 两种计算方法水量平衡对比分析

水稻田入流总量减去径流总量为出入流差值,根据水量平衡原理,应该等于生长季有水期总($E+F$)值。两种计算方法得到的水量平衡关系比较见表7,方法一计算的灌溉水量为866.9 mm,入流总量为1 330.6 mm,径流总量为303.2 mm,出入流差值为

1 027.2 mm,与有水期总($E+F$)值1 045.5 mm的水量亏损值为18.1 mm,占入流总量的1.4%,占总($E+F$)的1.7%;方法二的灌溉水量为907.6 mm,入流总量为1 371.3 mm,径流总量为244.0 mm,出入流差值为1 127.3 mm,与有水期总($E+F$)值1 045.5 mm的水量亏损值为81.8 mm,占入流总量的6.0%,占总($E+F$)的7.8%。方法一的水量平衡关系准确,误差在2%以内,方法二水量平衡关系存在一定误差,误差在6%~8%之间。两种方法计算的灌溉水量接近,差值占比为-4.5%,主要差值项为计算的径流总量,差值为59.2 mm。两种方法相比,方法一计算的水量亏损值更接近于0,因此方法一在水稻田水量平衡分析中具有更好的适用性和准确性。

2.3 污染输出负荷计算

试验点水稻田不同形态N、P及 COD_{Mn} 浓度变化见图7,污染物浓度均为在7/10之前较高、7/10之后浓度降低的趋势,这与水稻种植使用基肥、幼苗期及分蘖初期施用追肥有关,水稻在生长期前期,养分吸收能力有限,较多的营养物质会溶解在稻田田面水中。拔节孕穗期初期施用穗肥,但污染物浓度未明显升高,一方面与穗肥施用量较少有关,另一方面在于水稻此时吸收养分能力增大,会从田面水中吸收较多

表6 水稻田灌溉回归流情况统计

Table 6 Statistics of irrigation return flow of the paddy field				
序号 No	日期 Date	最低田埂高度 Lowest outlet height /mm	次灌溉水量 One irrigation/ mm	回归流产流量 Irrigation return flow volume /mm
1	2017/08/03	97.5	96.4	1.2
2	2017/08/07		87.1	2.3
3	2017/08/24		98.7	12.9
4	2017/08/30		106.2	14.7
5	2017/09/14		104.9	12.9
合计				44.0

表7 两种方法的水量平衡分析对比

Table 7 Comparison analysis of water balance between method one and method two										
方法 Method	降雨量 Precipitation	灌溉水量 Irrigation	入流总量 Total inflow	降雨产流 Rainfall runoff	人工排水 Drainage	回归流 Irrigation return flow	径流总量 Total runoff	出入流差值 Difference value	有水期 $\Sigma(E+F)$ with water	水量亏损值 Water loss value
方法一/mm	463.7	866.9	1 330.6	—	—	—	303.2	1 027.2	1 045.5	18.1
方法二/mm	463.7	907.6	1 371.3	16.5	183.5	44.0	244.0	1 127.3		-81.8
对比/%		-4.5	-3.0				24.3	-8.9		

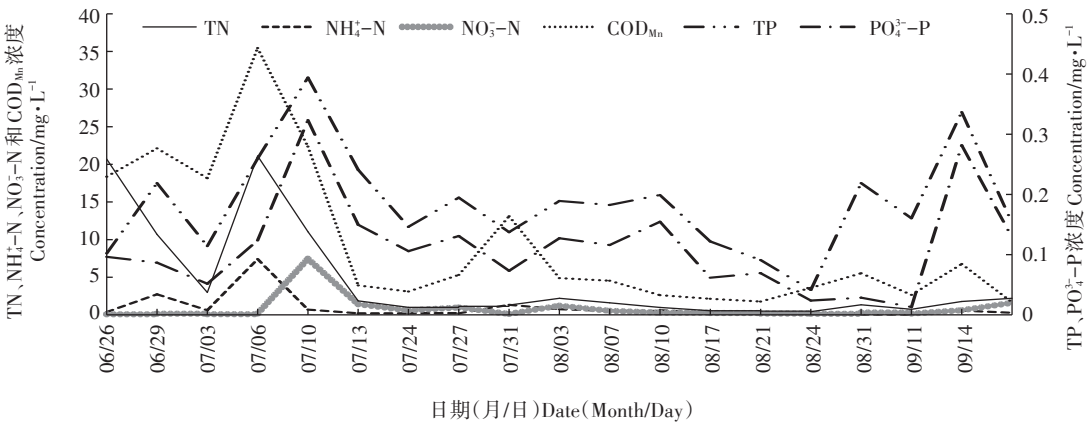


图7 水稻田田面水不同形态N、P及 COD_{Mn} 浓度

Figure 7 N,P and COD_{Mn} concentration in surface water of the paddy field

的养分。

结合水稻田水质浓度变化线,分别应用水量平衡计算方法一和方法二得到的径流水量计算水稻田生长季的污染输出系数。采用方法一计算得到TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD_{Mn} 的输出系数分别为9.11、2.22、1.35、0.45、0.27 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和19.83 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;方法二得到的各指标输出系数总体较方法一偏大,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD_{Mn} 的输出系数分别为12.04、2.26、1.03、0.36、0.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和22.81 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,两种方法计算得到水稻田污染输出系数对比见图8,各污染物输出系数中, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的输出系数相差最大,达到39.6%,其次 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 输出系数相差30.6%,之后依次为TP、TN和 COD_{Mn} ,输出系数均在10%~20%以内, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 输出系数相差最小为1.7%。总体比较两种计算方法得到的污染物输出系数相差范围,在可接受的范围内。

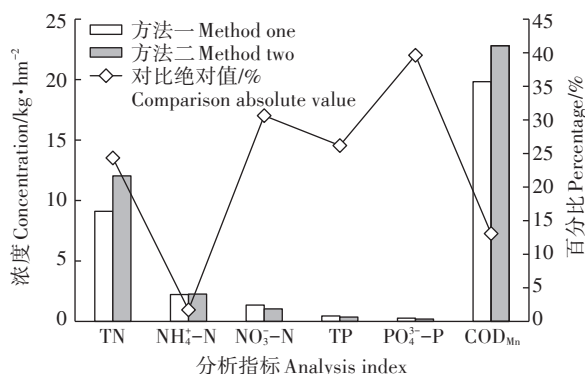


图8 两种计算方法水稻田污染输出系数

Figure 8 Comparison of pollution export coefficient of the paddy field between method one and method two

3 讨论

3.1 水稻田水量平衡分析

应用方法二的关键点之一在于最低田埂高度的确定,在水稻种植过程中,会根据农业生产管理的需要调整水位,水稻田最低田埂高度是动态变化的,径流出口可能会有多个。试验点水稻田最低田埂高度根据降雨产流判断判定,现场测量值为100 mm,与08/16降雨产流确定值97.5 mm接近,但径流冲刷等原因会降低最低田埂高度,使得判断的最低田埂高度值在08/16附近较为准确,相隔较远日期的水稻生长中后期则可能存在较大误差。方法二按统一最低田埂高度值计算,则会造成降雨产流和灌溉回归流偏小,从而使得计算的出流总量偏小。

对两种方法计算的径流进行对比分析,方法一、方法二分别计算有14、12次径流,其中9次径流时间能够相吻合。方法一计算的径流发生时间有时超过1 d,现实中是存在的。方法二计算的回归流在方法一中为次天产流,与方法一采用日均水位计算产流量有关。06/30方法二计算降雨产流1.9 mm,方法一未产流,可能与最低田埂高度变化有关。判断产流次数的差异主要在于方法一的第四次、第五次、第七次和第十四次产流,4次径流量均相对不大,日产流量均较小,而方法二均未产流,方法二对径流量较小场次产流判断可能存在较大误差。结合水量平衡分析结果,认为方法一在水稻田水量平衡分析具有更高的适应性和准确性。

两种方法计算的灌溉水量相近,均较准确,因此,方法二可用于灌溉水量计算的对比分析。方法一计算了稻田径流总量和径流次数,后续研究中,可结合降雨及人工管理措施情况,对每次产流进行人工排水、降雨产流、回归流的识别判断及进一步分析。最低田埂高度是影响水稻田产流的直接因素,因此,在水稻不同生产时期结合水稻田产流时水位及人工灌溉排水措施,进行水稻田最低田埂高度判断是后续研究的重点。

3.2 水稻田污染输出系数分析

对试验点水稻田的TN、TP输出系数与太湖流域水稻田径流污染情况及第一次全国污染源普查农田的输出系数进行比较,见表8,两种计算方法得到的TN、TP输出系数均在合理范围内,结合水量平衡分析结论,降雨-水位原位观测方法(方法一)应用于水稻田水量平衡分析和非点源污染负荷计算可信度较高。

4 结论

(1)通过水稻田水位稳定下降斜率计算水稻田蒸散发渗漏损失,得到水稻田生长季总($E+F$)值为1 087.2 mm。

(2)水稻田水量平衡分析中,方法一、方法二计算的水量亏损值分别为18.1 mm和81.8 mm,分别占入流总量的1.4%和6.0%,方法一在水稻田水量平衡分析中更准确。应用方法一得到试验点水稻田灌溉水量为866.9 mm,入流总量为1 330.6 mm,径流总量为303.2 mm。

(3)水稻田径流污染负荷计算中,应用方法一计算得到试验水稻田TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD_{Mn} 的输出系数分别为9.11、2.22、1.35、0.45、0.27

表8 太湖流域水稻田污染输出系数对比($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 8 Comparison analysis of pollution export coefficient of the paddy field in Taihu Lake basin($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

研究区 Research area	年份 Year	TN	TP	来源 Source
江苏宜兴	2010	10.73	0.75	[30]
江苏溧阳	2010	8.21	0.58	[30]
江苏吴江	2004	38.80	0.95	[31]
江苏溧阳	2014	49.40	1.00	[21]
江苏武进	2011	36.80	0.88	[13]
江苏武进	2012	13.75	0.30	[13]
南方湿润平原区 稻麦轮作水田		16.59	0.36	[32]
江苏宜兴	2017	9.11	0.45	本研究方法一
江苏宜兴	2017	12.04	0.36	本研究方法二

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $19.83\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,计算的污染物输出系数在合理的范围内。

(4)方法二径流量计算误差与最低田埂高度判断及径流量较小场次产流识别难度有关。两种方法计算的灌溉水量相近,方法二可用于灌溉水量的对比分析。应用基于降雨-水位原位观测方法(方法一)进行水稻田水量平衡分析和径流污染负荷核算具有较好的准确性和适应性。

参考文献:

- [1] 王慧亮,孙志琢,李叙勇,等.非点源污染负荷模型的比较与选择[J].环境科学与技术,2013,36(5):176-182.
WANG Hui-liang, SUN Zhi-zhuo, LI Xu-yong, et al. Comparison and selection among nonpoint pollution models[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(5): 176-182.
- [2] 谢润婷.非点源污染河流的水环境容量动态分析与定量研究[D].杭州:浙江大学,2017.
XIE Run-ting. Dynamic analysis and quantification of water environment capacity for the non-point source pollution dominated river[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [3] 王少丽,王兴奎,许迪.农业非点源污染预测模型研究进展[J].农业工程学报,2007,23(5):265-271.
WANG Shao-li, WANG Xing-kui, XU Di. Advances in the prediction models of agricultural non-point source pollution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 265-271.
- [4] Ongley E D, Xiaolan Z, Tao Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [5] 茆德安,陈金林,王世红,等.太湖流域农田生态系统管理与非点源污染控制[J].长江流域资源与环境,2007(4):489-493.
JIA De-an, CHEN Jin-lin, WANG Shi-hong, et al. Farm ecosystem management and control of non-point source pollution in Taihu Lake area, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007

(4):489-493.

- [6] 李娜,韩维峥,沈梦楠,等.基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J].农业工程学报,2016,32(8):224-230.
LI Na, HAN Wei-zheng, SHEN Meng-nan, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 224-230.
- [7] Cheng H F, Hu Y A, Hao J F. Meeting China's water shortage crisis: Current practices and challenges[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(2): 240-244.
- [8] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007, 317(5842): 1166.
- [9] 水利部太湖流域管理局,江苏省水利厅,浙江省水利厅,等.太湖健康状况报告(2016)[R].上海:水利部太湖流域管理局,2017.
Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Department of Water Resources of Jiangsu Province, Department of Water Resources of Zhejiang Province, et al. The health status report of Taihu Lake (2016)[R]. Shanghai: Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, 2017.
- [10] Qiao J, Yang L, Yan T, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 103-112.
- [11] 贾更华,颜志俊,王元元,等.太湖流域农业节水减污实地试验研究[J].人民长江,2013,44(3):81-84.
JIA Geng-hua, YAN Zhi-jun, WANG Yuan-yuan, et al. Field test and research on agricultural water-saving irrigation and pollution reduction in Taihu Lake Basin[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(3): 81-84.
- [12] 彭春瑞.农业面源污染防治理论与技术[M].北京:中国农业出版社,2013.
PENG Chun-rui. Theory and technology of prevention and control of agricultural non-point source pollution[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [13] 陈秋会,席运官,王磊,等.太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1550-1558.
CHEN Qiu-hui, XI Yun-guan, WANG Lei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1550-1558.
- [14] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu Lake region, China[J]. *Plant & Soil*, 2009, 319(1/2): 225-234.
- [15] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [16] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. From the cover: Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [17] 刘晓雨,李志鹏,潘根兴,等.长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1783-1790.

- LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1783-1790.
- [18] Choi J D, Park W J, Park K W, et al. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea[J]. *Paddy & Water Environment*, 2013, 11(1-4):241-248.
- [19] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2):62-66.
- HUANG Dong-feng, LI Wei-hua, WANG Li-min, et al. Effects of water and fertilizer managements on yield, nutrition uptake and loss of nitrogen and phosphorus by runoff from paddy field[J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2013, 27(2):62-66.
- [20] 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 等. 水稻田非点源污染原位试验研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4):1145-1152.
- ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, et al. In situ experiment on non-point source pollution in paddy fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(4):1145-1152.
- [21] 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 等. 不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3):963-969.
- ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, et al. Runoff pollution experiments of paddy fields under different irrigation patterns[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3):963-969.
- [22] Huang N B, Su B L, Li R R, et al. A field-scale observation method for non-point source pollution of paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146:305-313.
- [23] 杨一帆. 基于HSPF模型的宜兴平原河网地区非点源污染模拟相关研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- YANG Yi-fan. Simulation of non-point source pollution of river sinusity in Yixing based on HSPF model[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [24] 牛勇, 余辉, 牛远, 等. 太湖流域殷村港沉积物中营养元素及重金属污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1557-1562.
- NIU Yong, YU Hui, NIU Yuan, et al. Pollution of nutrients and heavy metals in sediments from Yincungang River of Lake Taihu basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1557-1562.
- [25] 杨晓英, 罗兴章, 郑正, 等. 平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究[J]. 环境科学, 2012, 33(9):3051-3056.
- YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, et al. Explore the spatial and temporal patterns of water pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu basin, China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9):3051-3056.
- [26] 马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998—2007年)[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1):29-34.
- MA Qian, LIU Jun-jie, GAO Ming-yuan. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998—2007[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1):29-34.
- [27] Khepar S D, Yadav A K, Sondhi S K, et al. Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices[J]. *Irrigation Science*, 2000, 19(4):199-208.
- [28] 朱从桦, 代邹, 严奉君, 等. 晒田强度和穗肥运筹对三角形强化栽培水稻光合生产力和氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2013(4):735-743.
- ZHU Cong-hua, DAI Zou, YAN Feng-jun, et al. Effects of different paddy field drainage degrees and panicle nitrogen fertilizer managements on photosynthetic productivity and nitrogen utilization of rice under triangle-planted system of rice intensification[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013(4):735-743.
- [29] 朱从桦, 孙永健, 杨志远, 等. 晒田强度和穗期氮素运筹对不同氮效率水稻根系、叶片生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017(6):196-203, 256.
- ZHU Cong-hua, SUN Yong-jian, YANG Zhi-yuan, et al. Effect of paddy field drainage and panicle nitrogen fertilizer management on rice root system, leaf growth and yield with different nitrogen efficiency[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017(6):196-203, 256.
- [30] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2011(4):21-25.
- XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, ZHU Li-qun, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011(4):21-25.
- [31] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007(4):495-500.
- JIAO Shao-jun, HU Xia-min, PAN Gen-xing, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus run-off loss from qingzini paddy soil in Taihu Lake region during rice growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007(4):495-500.
- [32] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查农业污染源肥料流失系数手册[R]. 北京:中华人民共和国农业部, 2009.
- The First China Pollution Source Census Leading Group Office of State Council. Manual on fertilizer loss coefficient of agricultural pollution source of the first China pollution source census[R]. Beijing: Ministry of Agriculture of PRC, 2009.