

长江中下游平原单季稻田氮素径流损失风险评估

文想成¹, 张泰¹, 董世杰², 姚瑶¹, 程钊强¹,
李祥¹, 王凤文¹, 程志庆¹, 马友华¹, 杨书运¹

(1.安徽农业大学资源与环境学院,合肥 230036;2.安徽省六安市气象局,安徽 六安 237000)

摘要: 稻田氮素径流损失是农业面源污染主要来源之一,以巢湖地区单季稻田为研究对象,利用该地区 1957—2019 年的历史气象数据,通过设定插秧区间(6 月 6—25 日)及施肥期水位(3, 10, 20 cm),建立 SMNRL 模型,模拟不同插秧时间和田面水水位稻田氮素流失,研究降低长江中下游平原气候区单季稻田氮素径流损失风险的插秧时间与水位控制模式。结果表明:(1)施肥后,稻田田面水氮素浓度呈指数衰减,基肥期田面水氮素衰减期为 9 天,分蘖肥和穗肥期为 7 天。(2)在 LW、HW 组合中,各施肥期占全生育的氮素径流损失为基肥期>分蘖肥期>穗肥期。在 LW 组合中,基肥期为氮素径流损失高发期,基肥、分蘖肥、穗肥的氮素流失为 72.4%~98.4%, 1.9%~27.6%, 0~8.3%。(3)控制水位比选择插秧时间对降低氮素径流损失更有效。相同水位下,适宜的插秧期氮素径流损失在全生育期施肥中合计能减少 0.4~4.5 kg/hm²,降低 32.8%~80.3%;相同插秧时间下,LW、MW 组合相比 HW 组合氮素径流损失能减少 8.8~13.1 kg/hm²,降低 92.1%~98.8%。(4)在 LW、MW、HW 3 种组合中,插秧期分别以 6 月 19 日、6 月 11 日、6 月 17 日为界,将 6 月 6—25 日分为前后 2 个阶段,前 1 阶段插秧产生氮素径流损失均值显著低于后 1 阶段,分别低 37.0%, 25.0%, 21.7%。(5)降低巢湖地区稻田氮素径流损失有效措施为施肥期水位控制为 3 cm,并选择 6 月 6—19 日期间进行水稻插秧。

关键词: 长江中下游平原; 巢湖地区; 单季稻; 氮素流失损失; 流失风险

中图分类号: X52; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0024-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.004

Risk Assessment of Nitrogen Runoff Loss in Single Cropping Paddy Field in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Plain

WEN Xiangcheng¹, ZHANG Tai¹, DONG Shijie², YAO Yao¹, CHENG Keqiang¹,
LI Xiang¹, WANG Fengwen¹, CHENG Zhiqing¹, MA Youhua¹, YANG Shuyun¹

(1.School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2.Meteorological Bureau of Luan City, Anhui Province, Luan, Anhui 237000)

Abstract: Nitrogen runoff loss from paddy fields is one of the main sources of agricultural non-point source pollution. In order to reduce the risk of nitrogen runoff loss from single-crop paddy fields in the climatic zone of the middle and lower reaches of the Yangtze River, a suitable fertilization and water level control model for this region was sought and the model of the SMNRL was built. This article used the historical meteorological data from 1957 to 2019 in the Chaohu Lake area by setting the rice transplanting interval (June 6 to 25) and the water level (3, 10, 20 cm) to simulate nitrogen loss in paddy fields. The result showed that: (1) After fertilization, the nitrogen concentration in the paddy field surface decreased exponentially. Nitrogen decay time of field water was 9 days at base fertilizer stage, and 7 days at tillering and earing fertilizer stage. (2) According to the order of nitrogen runoff loss that accounts for the whole growth in each fertilization period, in the combination of LW and HW, it was the basal fertilizer stage, the tiller fertilizer stage, and the panicle fertilizer stage. The nitrogen loss of basal fertilizer, tiller fertilizer, and panicle fertilizer was respectively 72.4% to 98.4%, 1.9% to 27.6%, and 0 to 8.3% in the combination of LW, and the basal fertilizer period was the period of high nitrogen runoff loss. (3) Controlling water level was more effective than reducing planting time to reduce nitrogen runoff loss. Under the same water level, the total nitrogen

收稿日期: 2020-03-31

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301301)

第一作者: 文想成(1996—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事应用气象研究。E-mail: wenxch1996@163.com

通信作者: 杨书运(1972—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业气象研究。E-mail: yangshy@ahau.edu.cn

runoff loss during the transplanting period were reduced by 0.4 to 4.5 kg/hm² and 32.8% to 80.3% during the whole growth period. Under the same transplanting time, the nitrogen runoff loss of the LW and MW combinations were reduced by 8.8 to 13.1 kg/hm² and 92.1% to 98.8% compared with the HW combination. (4) In the three combinations of LW, MW, and HW, June 6 to 25 was divided into the early and late stages of rice transplanting, with June 19, June 11, and June 17 as the boundaries respectively. The average nitrogen runoff loss in the early stage could be reduced by 37.0%, 25.0%, and 21.7% compared with the later stage. (5) The effective measures to reduce nitrogen runoff loss in rice fields in Chaohu Lake region were to control the water level during the fertilization period to 3 cm and choose a rice transplanting time between June 6th and June 19th.

Keywords: plain of the middle and lower reaches of the Yangtze River; Chaohu area; single cropping rice; nitrogen runoff loss; loss risk

水稻是我国第二大粮食作物和第一大主粮,2018 年全国播种面积 3 020 万 hm²,产量 2.1 亿 t,全国有 60% 以上的人口以稻米为主食^[1-2]。水稻生产产生的农田面源污染问题也不容忽视。氮肥除了被农作物吸收和土壤固定外,还有相当部分以氨挥发、径流和渗漏等方式流失到环境中,在降低氮肥利用率的同时形成农业面源污染^[3-5],我国水稻的氮利用率为 28.3%,低于世界平均水平^[6]。研究减少稻田氮素损失的方法、技术对发展低碳绿色生态环境友好型农业具有重要意义。

巢湖地区地处长江中下游核心地带,是以单季稻为主的稻作区。巢湖流域稻田流失的氮素大量进入地表水面,并汇入巢湖,造成巢湖水体严重富营养化,是亟待解决的重大环境问题。施肥后田面水氮素浓度变化对氮素流失具有决定性影响,不同学者对施肥后稻田田面水氮素浓度变化的研究结果略有不同,李喜喜等^[7]通过 7 种不同施肥处理发现,各处理的田面水总氮在施肥后 1~2 天达峰值,7~10 天下降至未施肥水平;吴俊等^[8]通过不同处理减量施肥研究发现,太湖地区稻田田面水总氮在施肥后第 1 天达峰值,并于 7 天后下降至较低水平;而张雪丽等^[9]通过有机肥替代化肥氮发现,洱海流域水稻田面水在施肥后第 14 天达到峰值,施肥后 1 个月内是防控氮素径流损失的关键期。相关研究都是从田面水浓度变化方面考虑氮素流失风险,而从水位调控的角度对氮素浓度变化及其对流失风险的影响则报道较少。氮素径流损失是长江流域单季稻生长期的主要损失途径^[10],对于氮素径流损失的主要研究方向为天然降雨和人工模拟降雨下来研究具体的氮素径流损失^[11-14],田玉华等^[15]采用管道流入径流收集池方法,通过连续 3 年的田间试验研究发现,太湖地区稻田氮素的径流损失量为 10.0~17.9 kg/hm²,占稻季施氮量的 0.3%~5.8%,且氮素径流损失量年际差异较大;王静等^[16]在传统耕作条件下研究巢湖流域水稻田发现,2008 年和 2009 年分别是 2.91,6.23 kg/hm²。由于年际降水差异大等因素,短期的氮素径流损失监测可能无法真实反映实际流失特征和控制效果。在稻

田氮素径流模型中,考虑灌溉等管理措施非常重要^[17]。对于利用历史降水、蒸发数据并考虑人工灌溉建立模型模拟氮素径流损失的研究鲜见,也较少有在水位调控的基础上考虑到不同插秧时间对稻田氮素径流损失的研究。侯朋福等^[18]通过多年降水数据研究太湖地区发现,稻田氮径流易发期为基肥期和蘖肥期,对不同施肥期的氮素径流损失研究很有必要。

综合以上研究情况,本文研究 3,10,20 cm 水位下各施肥期稻田田面水氮素浓度衰减期,建立 SMN-RL 模型,利用 63 年(1957—2019 年)的历史气象数据,逐年逐日模拟出巢湖地区在不同施肥期、水位、插秧时间的氮素径流损失。本文研究的目的是:(1)建立受降水、蒸发与人工灌溉等因素驱动的 SMNRL 模型,便于对稻田氮素径流损失模拟计算;(2)研究控制田面水水位比选择插秧时间对降低氮素流失风险更有效;(3)为长江中下游平原水稻种植区提供适宜的水位和插秧期,以达到降低稻田氮素流失风险,提高氮肥利用率与减少农业面源污染问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

长江中下游水稻种植区位于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 5 300 $^{\circ}\text{C}$ 等值线以北,淮河以南,鄂西山地以东至东海之滨,包括苏、浙、皖、豫、鄂、湘、沪 7 省市^[19]。巢湖位于长江中下游水稻种植区的中心位置(图 1),研究巢湖地区单季稻田氮素流失的控制技术对于该地区具有普遍意义。

田面水氮素浓度衰减试验于 2017 年 6 月 13 日在安徽农业大学农萃园进行,采用桶栽试验的方式(桶的直径为 30 cm、高为 40 cm)。供试土壤取自巢湖市烔炀镇稻田,每桶供试土壤为 15 kg,其初始基本农化性状为:土壤 pH 为 6.95,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 21.22,0.92,0.41,18.60 g/kg,速效钾、有效磷含量为 141.67,20.73 mg/kg。试验分为 3 个处理,4 次重复,试验处理分别为:3 cm 水位下施肥(T1);10 cm 水位下施肥(T2);20 cm 水位下施肥

(T3)。按照巢湖地区粮食丰产工程最优经济产量的施氮量,折合尿素 225 kg/hm²,并采用 4:4:2 的施肥方式,基肥、分蘖肥、穗肥 3 次施肥时间分别为 6 月 13 日、7 月 2 日和 8 月 15 日。水稻品种为“南粳 9108”,2017 年 6 月 13 日移栽,9 月 28 日收获。

水样采集:试验除田间日常管理外,于施肥当天(施肥前)采集水样作为第 0 天,并在施肥后的每天早晨 10:00 对第 1,2,3,5,7,9,12,15 天的田面水进行采样。采集方法:在不扰动土层下,采用医用注射器以每次 50 mL 采样,并注入到塑料瓶密封保存备测。采用德国 AA3 连续流动分析仪测定田面水的总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺)和硝态氮(NO₃⁻)等指标(本文仅用 TN 指标)。

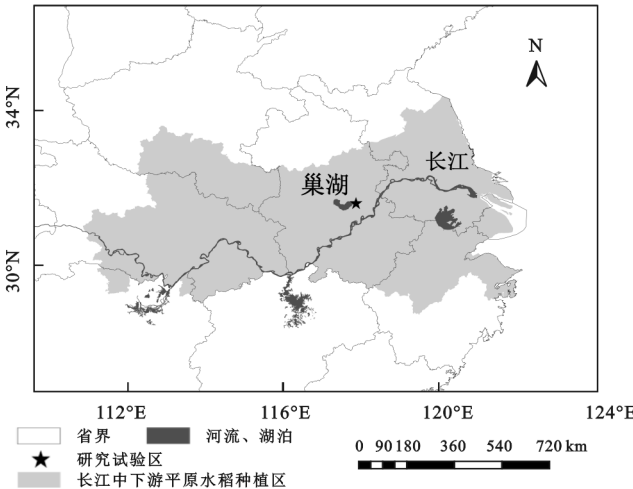


图 1 长江中下游平原水稻种植区

1.2 模型及模拟方法

1.2.1 统计区间划分 依据巢湖地区水稻高产栽培技术,田埂高度一般为 20 cm,在水稻分蘖前,为避免淹苗,排水口高度为 10 cm,分蘖以后排水口高度与田埂高度一致。因此,基肥期的排水口高度为 10 cm (基肥期只设 3,10 cm 2 种水位),分蘖肥和穗肥期排水口高度均为 20 cm。一般插秧时间在每年的 6 月 6—25 日期间,具体划分区间见表 1(由于基肥期为 6 月 6 日至 7 月 3 日,分蘖肥期为 6 月 21 日至 7 月 16 日,故基肥—分蘖肥期无法计算)。根据 2017 年 6 月 13 日至 9 月 28 日的田间试验研究表明(见 2.1 部分):施肥对基肥期、分蘖肥和穗肥期的田面水氮素浓度衰减期分别是 9,7,7 天,且相同肥期下氮素浓度衰减期不受水位变化的影响。

1.2.2 SMNRL 模型的建立

(1)Penman—Monteith 估算模型。根据世界粮农组织(FAO)在 1998 年修正的 Penman—Monteith 估算模型,计算出日蒸散量 $ET_0^{[20]}$,计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273.3} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

(1)

式中: ET_0 为日蒸散量(mm); Δ 为饱和水汽压—气温关系斜率(kPa/℃); R_n 为净辐射(MJ/m²); G 为土壤热曝辐量密度(MJ/m²); γ 为湿度计常数(kPa/℃); T_{mean} 为平均温度(℃); u_2 为 2 m 高度的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

表 1 插秧及施肥期区间划分

时期	施基肥后 天数/d	施肥影响 天数/d	区间 (月-日)	合计 天数/d
插秧期	1	无	06-06—06-25	20
基肥期(BF)	1	9	06-06—07-03	28
基肥—分蘖肥期(B-T)	—	—	—	—
分蘖肥期(TF)	15	7	06-21—07-16	26
分蘖肥—穗肥期(T-H)	无	无	07-17—07-30	14
穗肥期(HF)	55	7	07-31—08-25	26
穗肥—成熟期(H-M)	无	无	08-26—10-08	44

(2)SMNRL 模型。施肥后,稻田田面水在一定时期内会维持较高的氮素浓度,因降水、蒸发与人工灌溉等,田面水水位出现升降,当水位高于稻田排水口高度时,超出的田面水将排出稻田,水中的氮素随之排出,稻田形成氮素径流损失。本研究的假设条件为:(1)施肥时间,插秧前 1 天施基肥,分蘖肥与穗肥分别于施基肥后第 15,55 天进行;(2)排水口高度,基肥期为 10 cm,分蘖肥和穗肥期为 20 cm;(3)水位设定,基肥期(3,10 cm)、分蘖肥期(3,10,20 cm)、穗肥期(3,10,20 cm);(4)氮素浓度,依据实测值进行拟合,分别求出每种水位下各肥期的拟合函数(见 2.1 部分),并带入计算;(5)灌溉条件,当稻田田面水水位≤10 mm 时,即进行灌溉,并灌溉至设定水位。

为便于氮素径流损失的计算,建立氮素径流损失模拟模型(Simulation Model of Nitrogen Runoff Loss),简称 SMNRL 模型,即:将降水、蒸发与人工灌溉作为稻田田面水升降的驱动因素,在已知的原始水位、排水口高度及田面水氮素浓度下,计算施肥后稻田氮素径流损失。利用 SMNRL 模型可计算出第 t 天氮素径流损失,并模拟计算出 63 年(1957—2019 年)在 6 月 6—25 日插秧时期 3 种水位各肥期主要影响天数下氮素径流损失量。

$$N_f = \frac{[N + \sum_{n=1}^{t-1} (N_{i(n)} - N_{f(n)})] \times (H - H_d)}{H}$$

(2)

其中:

$$N = C \times H_s \times S \times 10^{-6}$$

(3)

$$N_i = \begin{cases} C_i \times (H_s - H) \times S \times 10^{-6} & H \leq H_{min} \\ 0 & H > H_{min} \end{cases}$$

(4)

$$H = h + P - ET_0$$

(5)

式中: N_f 为第 t 天稻田氮素径流损失(kg/hm²); N 为施肥后(不考虑第 t 天前的灌溉与径流)第 t 天稻田中含

有的氮素量(kg/hm²); $N_{i(n)}$ 为第 n 天稻田灌溉增加的氮素量(kg/hm²); $N_{f(n)}$ 为第 n 天稻田氮素径流损失(kg/hm²); H 为第 t 天稻田田面水水深(mm); H_d 为稻田排水口高度(mm); C 为第 t 天(不考虑灌溉水浓度)氮素浓度(mg/L); C_i 为灌溉水氮素浓度,依据当地实际取 2.59 mg/L; H_s 为设定的稻田田面水水位(mm); S 为稻田面积(hm²); $H_{\min}$ 为稻田田面水最低水深,本文取 10 (mm); h 为第 $t-1$ 天稻田田面水水深(mm); P 为第 t 天降水量(mm); ET_0 为 Penman—Monteith 估算模型计算的第 t 天蒸散量(mm)。

1.2.3 数据分析方法

(1)处理设置。①降雨频次,某日在多年中发生降雨的次数;②日降水概率,某日在多年降水中发生降雨频次与年份数之比,即日降水概率=降雨频次/年数×100%;③单次降水量,某日多年累积降水量与该年份数中降雨频次之比,即单次降水量=累积降雨量/降雨频次。

为研究各生育期逐年氮素流失,采用的模拟处理为:①氮素绝对流失量,某一肥期逐年每一插秧时间的氮素流失量;②氮素相对流失量,某一肥期一年在某一插秧时间的氮素流失与该肥期氮素绝对流失最大值之比;③流失风险,根据氮素绝对流失大小确定的风险等级,将 $x=0, 0<x\leq 1, 1<x\leq 10, x>10$ (kg/hm²)分为 4 个流失风险等级,依次为无风险(NR)、低风险(LR)、中流失(MR)和高流失(HR)。

为研究全生育期 3 次施肥总氮素径流损失,采用 3 种组合:①低水位组合氮素流失(基肥期、分蘖肥期和穗肥期均为 3 cm 水位),记为 LW;②中水位组合氮素流失(基肥期为 3 cm,分蘖肥期和穗肥期为 10 cm),记为 MW;③高水位组合氮素流失(基肥期 10 cm,分蘖肥期和穗肥期均为 20 cm,即满水位),记为 HW。

(2)累计距平法。对于序列 x ,其某一时刻 t 的累计距平表示为^[21]:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), t=1, 2, \cdots, n \tag{6}$$

其中:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{7}$$

将 n 个时刻的累计距平值分别算出,并画出累计距平曲线进行趋势分析。

2 结果与分析

2.1 施肥后不同水位下稻田田面水氮素浓度变化

从图 2 可以看出,同一施肥期不同水位下的氮素浓度变化趋势一致,稻田 3 次施肥后田面水氮素浓度变化在第 1 天(基肥期、分蘖肥期)、第 3 天(穗肥期)达峰值后,再呈指数下降,于第 9 天(基肥期)、第 7 天

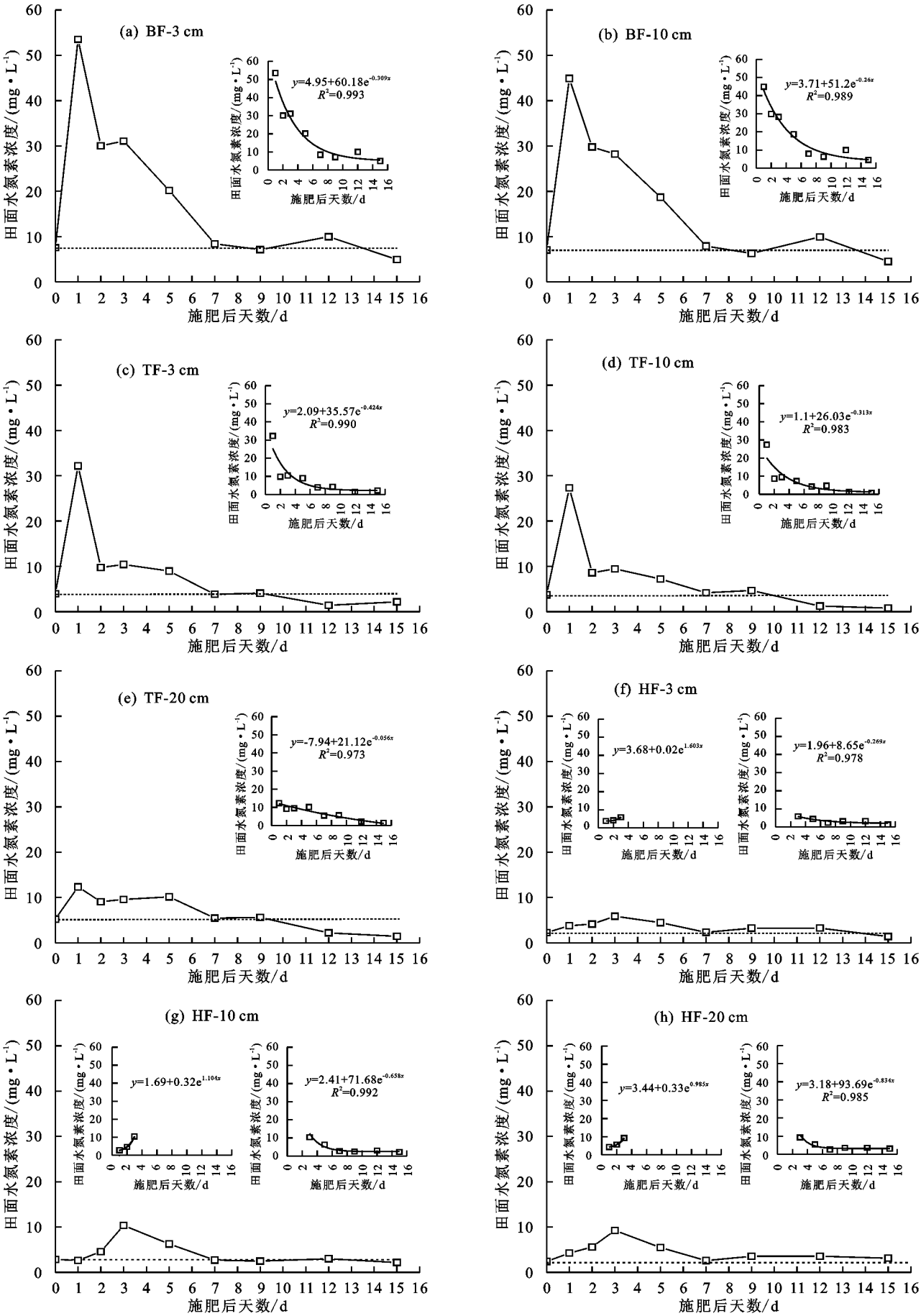
(分蘖肥期、穗肥期)趋于施肥前水平。基肥期、分蘖肥期的氮素浓度自施肥后第 1 天开始衰减,进行下降指数拟合;穗肥期在第 1~3 天上升,第 3~7 天下降,分段进行上升指数与下降指数拟合(表 2)。说明基肥期氮素浓度衰减期为 9 天,分蘖肥与穗肥期为 7 天,基肥期氮素径流损失防控关键期为 9 天,分蘖肥与穗肥期为 7 天。

在基肥期,3,10 cm 水位氮素浓度峰值为 53.6, 44.9 mg/L,峰值时 3 cm 比 10 cm 水位氮素浓度高 19.2%(图 2a,图 2b);在分蘖肥期,3,10,20 cm 水位氮素浓度峰值为 32.2,27.3,12.3 mg/L,峰值时的 3 cm 比 10,20 cm 水位氮素浓度高 17.8%,160.8%(图 2c,图 2d,图 2e);在穗肥期,3,10,20 cm 水位的氮素浓度 5.9,10.4,9.3 mg/L,峰值时 20 cm 比 3,10 cm 水位氮素浓度高 12.7%,61.0%(图 2f,图 2g,图 2h)。说明基肥期、分蘖肥期田面水氮素浓度明显高于穗肥期,二者于施肥后第 1 天达到峰值,且 3,10 cm 水位下这 2 个肥期的氮素浓度差距仅在 20.0%以内。

2.2 年降水与稻季日降水特征

2.2.1 降水特征 依据巢湖地区 1957—2019 年的历史降水数据,年降水与稻季降水变化趋势具有一致性,年降水与稻季降水的最低、最高年份相同,依次为 1978 年和 1991 年(图 3)。年降水量、稻季降水量最低值占最高值的比重分别为 26.4%,14.9%,说明巢湖地区不同年份稻季降水差异大,存在明显的旱涝季。年降水量为 525.5~1 988.4 mm,均值为 1 068.5 mm;稻季降水量(6 月 6 日至 10 月 8 日)范围为 196.8~1 323.5 mm,均值为 547.7 mm,稻季降水量占年降水量均值的 51.3%,说明稻季降水为全年主要降水,稻季降水对稻田田面水氮素径流损失至关重要。

2.2.2 稻季日降水概率及单次降雨量 巢湖地区近 63 年的单次降水量与日降水概率呈波动变化趋势(图 4)。基肥期(BF)、分蘖肥期(TF)、穗肥期(HF)日降水概率和单次降水量均值分别为 39.8%和 14.6 mm, 43.5%和 17.3 mm,35.4%和 11.9 mm;分蘖肥—穗肥期(T—H)、穗肥—成熟期(H—M)日降水概率和单次降水量依次为 32.3%、13.1 mm,32.0%、8.8 mm。其中,日降水概率最高、最低分别为 57.1%,19.1%,依次为 6 月 25 日(BF,TF)、9 月 27 日(H—M);单次降水量最高、最低分别为 25.9,2.9 mm,依次为 6 月 13 日(BF)、9 月 13 日(H—M)。表明日降水概率依次为 TF>BF>HF>T—H>H—M,单次降水量分别为 TF>BF>T—H>HF>H—M,且日降水概率与单次降水量最高值均出现在 BF 和 TF,说明巢湖地区稻田在基肥期和分蘖肥期是氮素流失风险的高发期。



注:图中虚线表示施肥前田面水氮素浓度(mg/L)。

图 2 不同水位下各肥期的田面水氮素浓度动态变化

表 2 不同水位下各肥期的田面水氮素浓度变化拟合函数

肥期—水位/cm	拟合函数	拟合效果 R^2
BF—3	$Y=4.95+60.18e^{-0.309x}$	0.993
BF—10	$Y=3.71+51.20e^{-0.260x}$	0.989
TF—3	$Y=2.09+35.57e^{-0.424x}$	0.990
TF—10	$Y=1.10+26.03e^{-0.313x}$	0.983
TF—20	$Y=-7.94+21.12e^{-0.056x}$	0.973
HF—3	上升: $Y=3.68+0.02e^{1.603x}$, 下降: $Y=1.96+8.65e^{-0.269x}$	0.978
HF—10	上升: $Y=1.69+0.32e^{1.104x}$, 下降: $Y=2.41+71.68e^{-0.658x}$	0.992
HF—20	上升: $Y=3.44+0.30e^{-0.985x}$, 下降: $Y=3.18+93.69e^{-0.834x}$	0.985

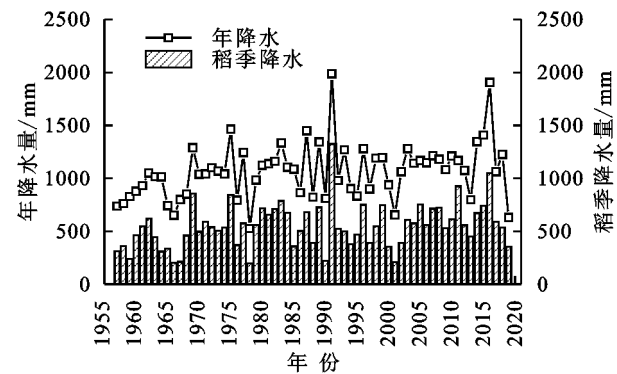


图 3 1957—2019 年近 63 年巢湖地区年降水量与稻季降水量

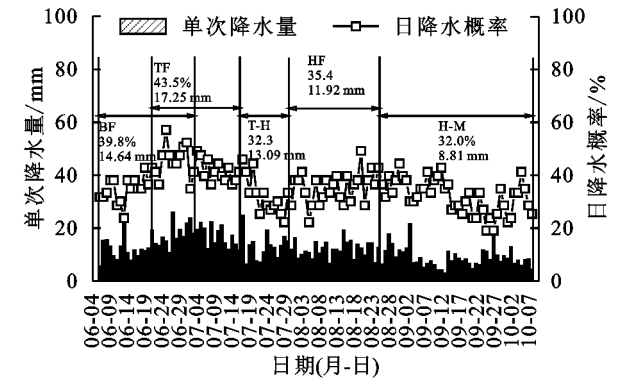


图 4 1957—2019 年近 63 年稻季的日降水概率与单次降水量

2.2.3 稻季日降水与日蒸发 巢湖地区近 63 年稻季日降水量均值呈先波动上升再波动下降的趋势(以 6 月 27 日为界),稻季日蒸发量均值总体上呈平稳上升再到平稳下降的趋势(以 7 月 25 日为界),在 T—H、HF 蒸发相对较高。BF、TF 日降水量均值高于日蒸发均值,且降水量与蒸发量差值分别为 1.6 mm(降水 5.9 mm,蒸发 4.3 mm)、3.1 mm(降水 7.5 mm,蒸发 4.4 mm);T—H、HF、H—M 3 个时期的日降水量均值低于日蒸发量均值,且降水量与蒸发量差值分别为-1.0 mm(降水 4.3 mm,蒸发 5.3 mm),-0.5 mm(降水 4.2 mm,蒸发 4.7 mm),-0.6 mm(降水 2.8 mm,蒸发 3.4 mm)(图 5)。因此,日降水量与蒸发量的差值依次为 TF>BF>HF>H—M>T—H,进一步说明,在考虑蒸发情况下,基肥期与分蘖肥期仍是稻田氮径流发生的高发期。

2.3 稻田氮肥流失风险评估

2.3.1 不同施肥期逐年氮素径流损失分析 依据图 6、图 7 和图 8 在基肥期中,10 cm 水位的氮素绝对流失

范围为 0~32.2 kg/hm²,存在流失风险的概率为 61.4%,高风险流失概率为 30.0%;3 cm 水位氮素绝对流失最大值为 8.3 kg/hm²,氮素相对流失在 25.7%以下,流失风险概率为 19.9%,无高风险流失。在分蘖肥期,20 cm 水位的氮素绝对流失为 0~19.7 kg/hm²,流失风险概率达 63.9%,高风险概率为 21.7%;3,10 cm 水位氮素绝对流失最大值分别为 3.7,13.0 kg/hm²,氮素相对流失依次在 18.9%,66.0%以下,流失风险概率为 4.3%,14.0%,仅 10 cm 水位下存在 0.1%的高风险流失概率。穗肥期中,20 cm 水位的氮素绝对流失范围为 0~13.8 kg/hm²,流失风险概率为 46.0%,高风险概率仅为 0.7%;3,10 cm 水位的氮素绝对流失最大值达 0.7,7.2 kg/hm²,相对流失在 5.4%,52.6%以下,流失风险仅为 1.1%,3.7%,无高风险流失。说明在整个插秧区间中,水位越高氮素径流损失越大,3 cm 水位下的基肥期、分蘖肥期、穗肥期的氮素相对流失分别在 25.7%,18.9%,5.4%以下;10 cm 水位的基肥期、20 cm 的分蘖肥期为高风险流失的主要发生期,高风险流失概率分别为 30.0%,21.7%。

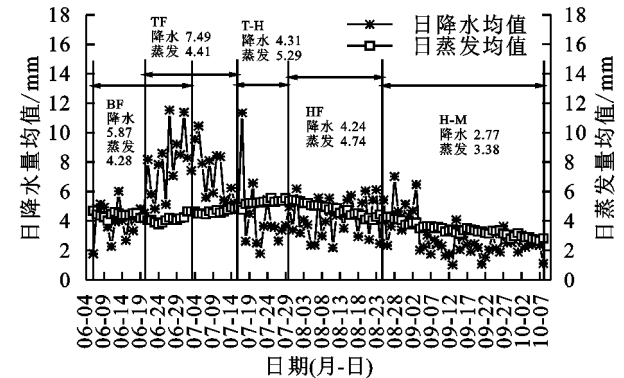


图 5 1957—2019 年近 63 年稻季日降水量与日蒸发量均值

2.3.2 不同施肥期多年均值氮素径流损失分析 施肥期相同,水位越高,氮素径流损失与流失概率越大,即 20 cm>10 cm>3 cm;水位相同氮素径流损失与流失概率大小为基肥期>分蘖肥期>穗肥期(图 9)。在水位相同而插秧时间不同下,基肥期 3,10 cm 水位下多年均值氮素流失范围为 0.1~0.6,4.1~8.5 kg/hm²,适宜的插秧时间至多能降低 81.7%,51.8%的氮素流失;分蘖肥期 3,10,20 cm 水位氮素径流损失为 0~0.1,0.2~0.5,3.8~5.3 kg/hm²,适宜的插秧

时间至多能降低氮素流失 65.1%,62.7%,55.2%;在穗肥期的 3,10,20 cm 水位下氮素流失范围为 0~0.1,0~0.2,0.7~1.4 kg/hm²,适宜的插秧时间至多能降低 100.0%,100.0%,52.8%。

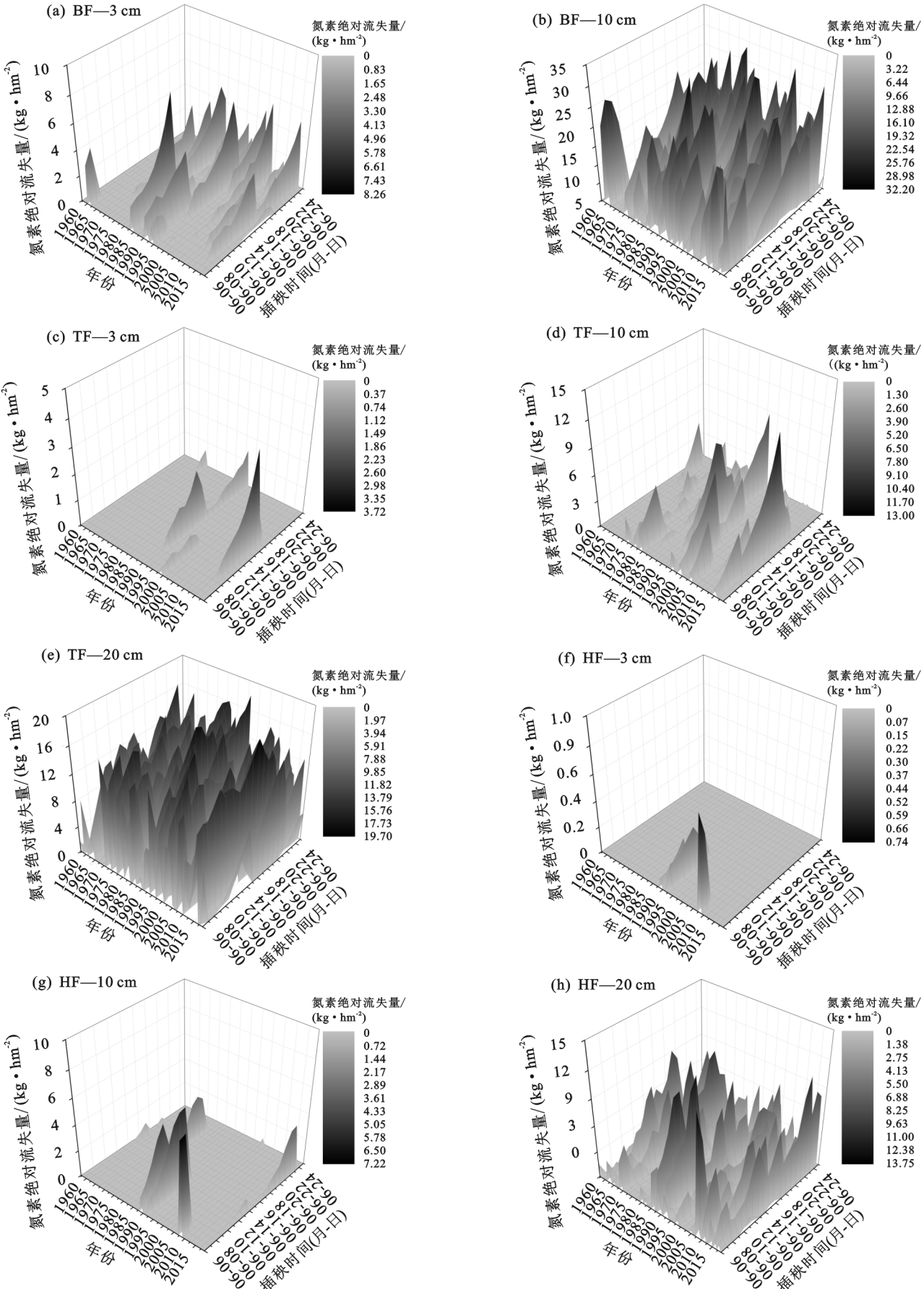


图 6 1957—2019 年近 63 年逐年氮素绝对流失量

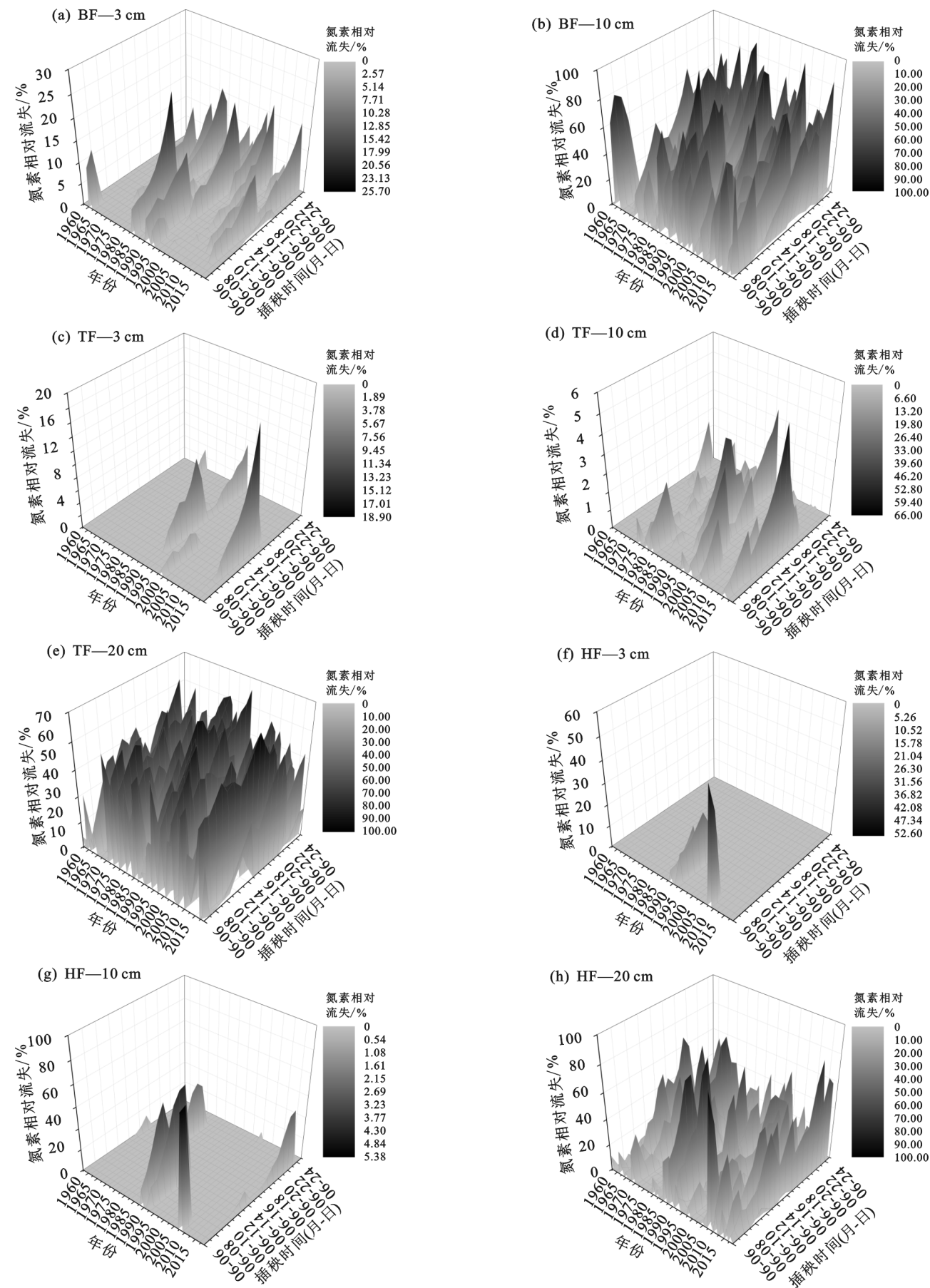


图 7 1957—2019 年近 63 年逐年氮素相对流失

同插秧时间不同水位下,基肥期 3 cm 比 10 cm 水位平均能降低 94.8%,分蘖肥期,3,10 cm 比 20 cm 水位能降低 99.4%,92.9%,穗肥期 3,10 cm 比 20 cm 水位能降低 99.6%,91.9%。说明在水位相同插秧时间不同下,

施肥期 3,10 cm(基肥期 10 cm 除外)水位下,适宜的插秧时间至多能降低 62.7%~100.0%,施肥期 20 cm(包括基肥期 10 cm)水位下适宜的插秧时间至多能降低 51.8%~55.2%;同插秧时间不同水位下,在施肥期 3,10 cm 比 20 cm 水位(基肥期为 3 cm 比 10 cm 水位)下平均能降低 91.9%~99.6%。

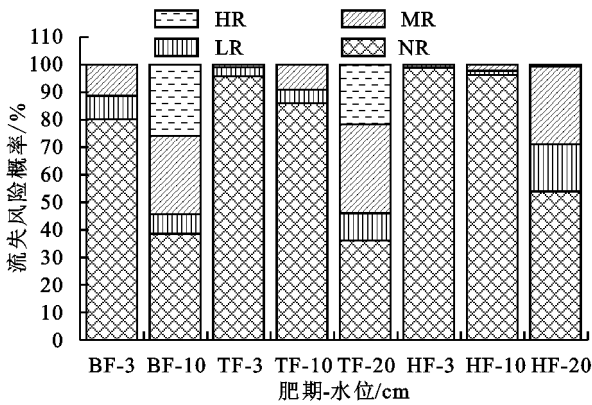


图 8 不同水位下 3 个施肥期氮素流失风险概率

2.3.3 全生育期多年均值氮素径流损失分析 插秧期的延迟,3 种水位组合的氮素流失均呈现波动上升的趋势(图 10)。在 LW、MW、HW 组合中,6 月 6—25

日插秧时间区间中氮素径流损失分别为 0.1~0.7, 0.5~0.9,9.3~13.8 kg/hm²,同水位组合下插秧区间内最低值占最高值的比重依次为 19.7%,52.2%,67.2%,氮素流失均值分别为 0.4,0.7,11.3 kg/hm²;在相同插秧时间下,LW、MW 组合氮素流失只占 HW 组合的 1.2%~4.8%,4.8%~7.9%,能降低 9.1~13.1,8.8~12.9 kg/hm²的氮素径流损失。在 LW、MW、HW 组合中,基肥期占全生育期氮素流失依次为 72.4%~98.4%,18.7%~72.4%,42.9%~62.0%;分蘖期占全生育期的 1.9%~27.6%,25.9%~71.1%,27.6%~48.4%;穗肥期占比最少,只占全生育期的 0~8.3%,0.03%~30.3%,6.6%~11.9%。说明相同水位下适宜的插秧期氮素径流损失能减少 0.4~4.5 kg/hm²,降低 32.8%~80.3%;相同插秧时间下,LW、MW 组合相比 HW 组合氮素径流损失能减少 8.8~13.1 kg/hm²,降低 92.1%~98.8%;在 LW、HW 组合中,各施肥期占全生育的氮素径流损失为基肥期>分蘖肥期>穗肥期,而在 MW 组合中,分蘖肥期占全生育氮素径流损失比重最大,各施肥期氮素径流损失随插秧时间变动影响的波动范围最大。

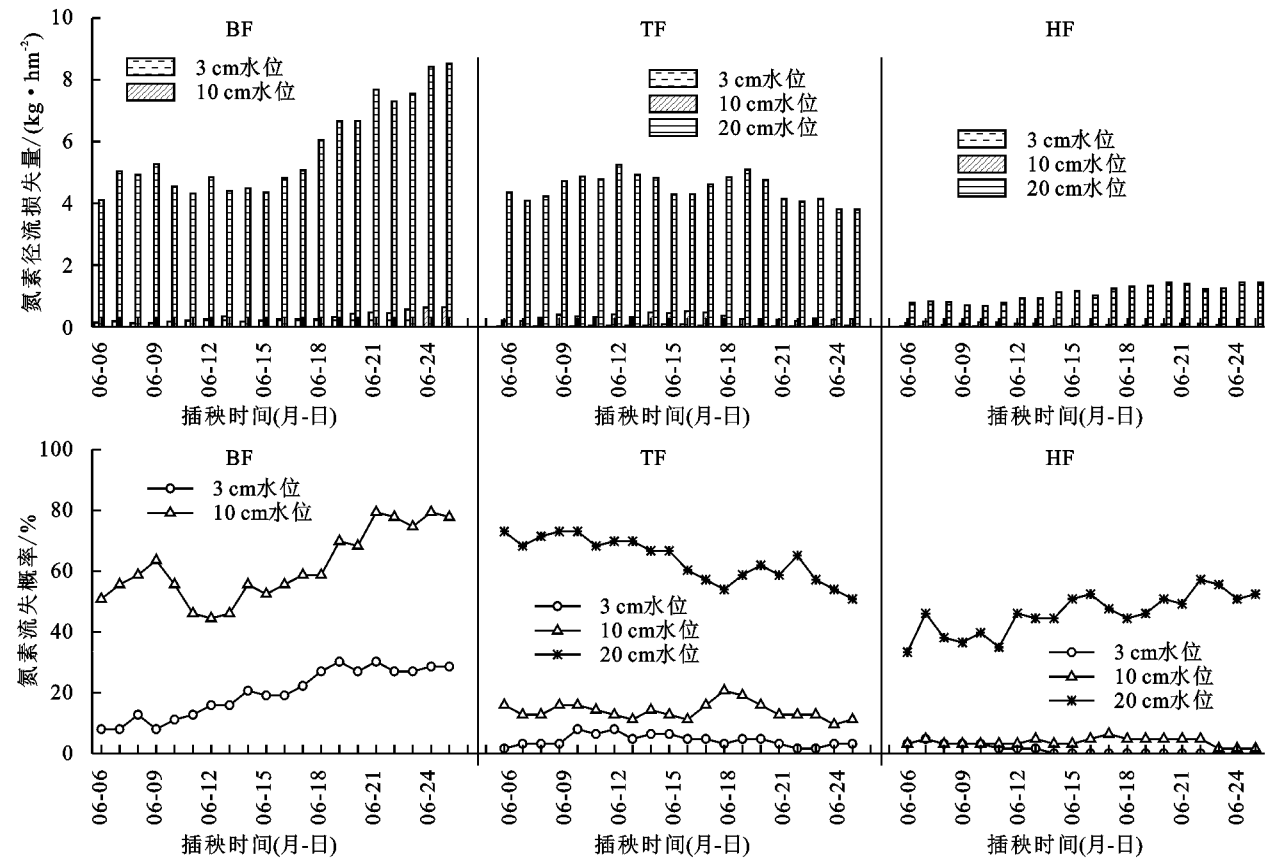


图 9 不同施肥期氮素径流损失和流失概率

3 个组合氮素径流累计距平为负值,且总体呈现先下降再上升的趋势,说明在 6 月 6—25 日这 20 个插秧期可以分为 2 个阶段(图 11)。在 LW 组合中,最低值为 6 月 19 日,可以分为前期 6 月 6—19 日、后期 6 月 20—25

日(图 11a);在 MW 组合中,最低值为 6 月 11 日,可以分为前期 6 月 6—11 日、后期 6 月 12—25 日 2 个阶段(图 11b);在 HW 组合中,最低值为 6 月 17 日,可以分为前期 6 月 6—17 日、后期 6 月 18—25 日(图 11c)。

在 LW、MW 和 HW 组合中,前期氮素径流损失均值分别只占后期的 63.0%,75.0%和 78.2%,分别能降低 37.0%,25.0%,21.7%,水位越低的情况下,前期插秧风险比后期小的概率更大(表 3)。

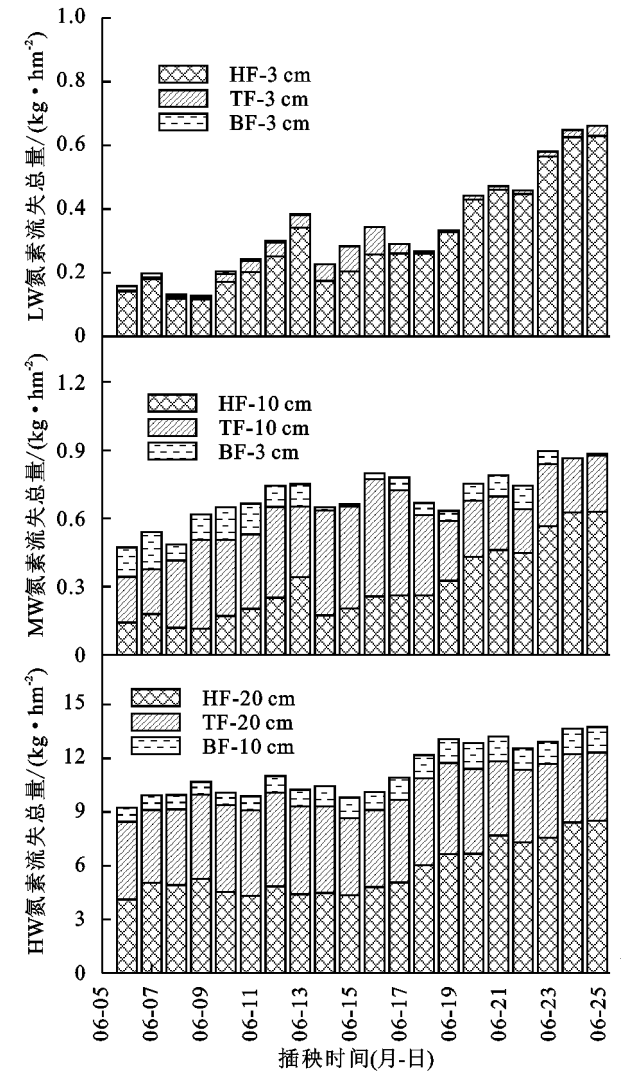


图 10 全生育期氮素径流损失

3 讨论

不同地区稻田田面水中氮磷动态变化特征不同^[22]。杨坤宇等^[23]认为,早晚稻田面水总氮浓度在

第 1 天达到峰值,并在 10 天后恢复到正常水平;张富林等^[24]认为,施肥对稻田田面水的影响在施肥后第 1 天达到峰值,在基肥和分蘖肥后 5 天、穗肥后 2 天降低至与不施氮肥基本接近。本研究结果表明,在基肥期施肥对田面水氮素浓度的影响主要到第 9 天,而在分蘖肥和穗肥期影响到第 7 天,这与董世杰等^[25]和朱利群等^[26]的研究结果一致。

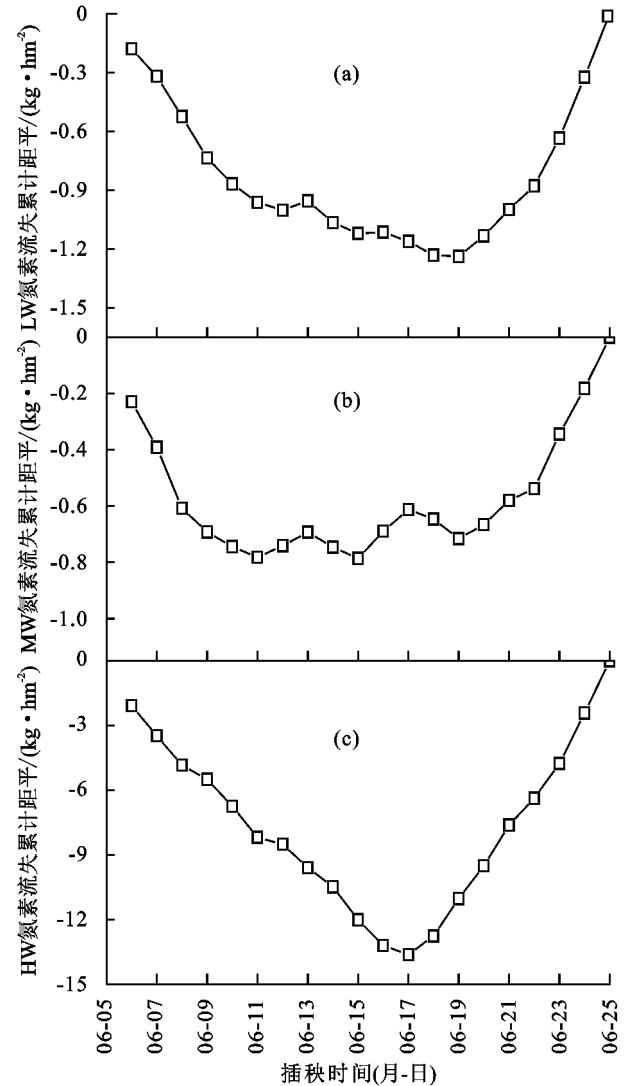


图 11 全生育期氮素径流损失累计距平

表 3 不同插秧时段差异分析

组合水位	时段(月-日)	样本数	平均值/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	标准差/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	变异系数/%
LW	06-06—06-19	14	0.34	0.16	47.8
	06-20—06-25	6	0.54	0.10	18.2
MW	06-06—06-11	6	0.57	0.08	14.6
	06-12—06-25	14	0.76	0.09	11.3
HW	06-06—06-17	12	10.20	0.50	4.9
	06-18—06-25	8	13.04	0.53	4.0

有研究^[15-16]表明,由于年际降水差异大,造成稻田的氮素径流年际差异大,可见短期内通过监测氮素径流损失很难真实反映氮素流失特征。本文建立的

SMNRL 模型,模拟计算了巢湖地区 63 年的氮素径流损失。该模型综合考虑了驱动田面水产生变动的自然因素(降水、蒸发)和人为因素(设定原始水位、灌

溉、排水口高度)等,对于其他研究区域,只需提前测算出该区域稻田田面水在各施肥期的氮素浓度变化值及当地灌溉水的浓度,也能通过 SMNRL 模型对稻田氮素径流损失进行长期的模拟计算。

本文通过分析 63 年氮素径流损失表明,在 LW、MW、HW 组合中,6 月 6—25 日插秧时间区间中氮素径流损失分别为 0.1~0.7,0.5~0.9,9.3~13.8 kg/hm²。有学者^[27]通过长江中游地区 2 年田间实测对 WHCNS 模型进行标定和验证发现,施肥后大约 46.0% 的氮肥通过各种途径流失到环境中,其中氮素径流损失只占总流失量的 5.0%。本文采用的施肥量为 225 kg/hm²,按照上述研究结果计算,氮素径流损失为 5.2 kg/hm²,介于 MW 与 HW 组合之间,说明在施肥期将水位控制在 LW 和 MW 组合中能够降低绝大多数的氮素径流损失。

关于稻田氮素径流损失,研究不同施肥期也很重要^[18]。在 6 月 6—25 日插秧区间,LW、MW、HW 组合下的基肥期占全生育期氮素流失分别为 72.4%~98.4%,18.7%~72.4%,42.9%~62.0%;分蘖期占全生育期的 1.9%~27.6%,25.9%~71.1%,27.6%~48.4%;穗肥期占比最少,仅占全生育期的 0~8.3%,0.03%~30.3%,6.6%~11.9%,说明由于插秧区间存在,各肥期占全生育期氮素流失存在波动范围,故插秧期的选择对各肥期占全生育期的比重也有一定影响,MW 组合受插秧期的选择更为显著。在 LW、HW 组合中,各施肥期占全生育期的氮素径流损失为基肥期>分蘖肥期>穗肥期,而在 MW 组合中,为分蘖肥期>基肥期>穗肥期,说明基肥期和分蘖肥期为氮素径流主要发生期,主要原因是基肥、分蘖肥期日降水均值和降水概率比穗肥期大,且施肥量占总施肥量的比重是穗肥期的 2 倍。刘红江等^[28]研究发现,基肥期、分蘖肥期和穗肥期施肥比例为 1:1:3 可有效降低水田地表面径流氮素流失;王强等^[29]采用一次性施肥模式通过缓释氮肥的应用和氮肥减量等措施发现,一次施肥并没有增加稻田氮素径流损失风险。因此,可以通过调整施肥比例或改变施肥次数来降低基肥期和穗肥期的氮素径流损失。稻田田面水受田埂保护防止溢出,只有在降雨发生时,田面水才会溢出产生径流^[30]。在 LW 组合中(各肥期水位相同,为 3 cm),基肥期占全生育期的氮素流失高达 72.4%~98.4%,这是因为基肥期为防止排水口过高出现淹苗,排水口高度仅为 10 cm(分蘖肥和穗肥期为 20 cm)。可以通过选用植株偏高的秧苗品种,以达到适当增加基肥期排水口高度的目的。

在以后的试验中可以多设置几种水位下测算稻田总氮浓度,以确定最适宜的水位。本研究只考虑水位和插秧期的变化对稻田氮径流量的影响,未考虑水位过低存在多次灌溉的管理成本,也未考虑氮径流较低情况下的水位和插秧对水稻产量和甲烷排放的影响。因此,在以后的试验中可以综合考虑经济效益(稻田管理成本、稻田产量收入)和环境效益(甲烷排放、氮径流量),以确定多高水位、何时插秧对水稻的综合效益最高。

4 结论

(1)在不同水位下,同一肥期施肥对稻田田面水浓度影响天数一致。基肥期氮素浓度衰减期为 9 天,分蘖肥与穗肥期为 7 天。

(2)控制水位比选择插秧时间对降低氮素径流损失更有效。在水位相同插秧时间不同时,施肥期 3,10 cm(基肥期 10 cm 除外)水位下,适宜的插秧时间最多能降低 62.7%~100.0%,施肥期 20 cm(包括基肥期 10 cm)水位下适宜的插秧时间最多能降低 51.8%~55.2%;适宜的插秧期在全生育期施肥中氮素径流损失合计减少 0.4~4.5 kg/hm²,降低 32.8%~80.3%。同插秧时间不同水位下,在施肥期 3,10 cm 比 20 cm 水位(基肥期为 3 cm 比 10 cm)下平均降低 91.9%~99.6%;LW、MW 组合相比 HW 组合氮素径流损失减少 8.8~13.1 kg/hm²,降低 92.1%~98.8%。

(3)在 LW、HW 组合中,各施肥期占全生育的氮素径流损失为基肥期>分蘖肥期>穗肥期。而在 MW 组合中,分蘖肥期占全生育氮素径流损失比重最大,各施肥期氮素径流损失随插秧时间变动影响的波动范围最大。在 LW 组合中,基肥期占全生育期氮素径流损失的 72.4%~98.4%,为氮素径流损失高发期;在 HW 组合中,基肥、分蘖肥期为氮素径流损失高发期,分别占全生育 42.9%~62.0%,27.6%~48.4%。

(4)相同水位下适宜的插秧期能减少流失 0.4~4.5 kg/hm²氮素损失;相同插秧时间下 LW、MW 组合降低 96.7%,93.8% 的氮素径流损失。在 LW、MW、HW 组合中,插秧期分别以 6 月 19 日、6 月 11 日、6 月 17 日为界,将 6 月 6—25 日分为前、后 2 个阶段,前 1 阶段产生氮素径流损失均值分别只占后 1 阶段的 63.0%,75.0%和 78.2%,分别能降低 37.0%,25.0%,21.7%,水位越低的情况下,前期插秧风险比后期小的概率更大。

(5)本文分析表明,降低巢湖地区稻田氮素径流损失有效措施为施肥期水位控制为 3 cm,且插秧时间选择 6 月 6—19 日。

参考文献:

[1] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019:385-391.

[2] 方福平,程式华.水稻科技与产业发展[J].农学报,2018,8(1):92-98.

[3] Yan W J, Huang M X, Zhang S, et al. Phosphorus export by runoff from agricultural field plots with different crop cover in Lake Taihu watershed[J].Journal of Environmental Science,2001,13:502-507.

[4] Liu R M, Wang J W, Shi J H, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J].Science of the Total Environment,2014,468/469:1069-1077.

[5] Zhang G S, Li J C, Hu X B, et al. On-farm assessment of soil erosion and non-point source pollution in a rain-fed vegetable production system at Dianchi lake's catchment, southwestern China[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2013,96(1):67-77.

[6] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.

[7] 李喜喜,王昌全,杨娟,等.猪粪施用对水稻田面水养分动态变化特征及流失风险的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):130-136.

[8] 吴俊,樊剑波,何园球,等.不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J].生态环境学报,2012,21(9):1561-1566.

[9] 张雪丽,董文怡,刘勤,等.有机肥替代化肥氮对水稻田面水和土壤中氮素含量的影响[J].中国农业气象,2018,39(4):256-266.

[10] 王桂良,崔振岭,陈新平,等.南方稻田活性氮损失途径及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(8):104-112.

[11] 梁新强,田光明,李华,等.天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J].水土保持学报,2005,19(1):59-63.

[12] 薛鹏程,庞燕,项颂,等.模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1362-1368.

[13] 陈颖,赵磊,杨勇,等.海河流域水稻田氮磷地表径流流失特征初探[J].农业环境科学学报,2011,30(2):328-333.

[14] 田平,陈英旭,田光明,等.杭嘉湖地区淹水稻田氮素径流流失负荷估算[J].应用生态学报,2006,17(10):1911-1917.

[15] 田玉华,尹斌,贺发云,等.太湖地区稻季的氮素径流损失研究[J].土壤学报,2007,44(6):1070-1075.

[16] 王静,郭熙盛,王允青,等.保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1164-1171.

[17] Hou X K, Zhou F, Leip A, et al. Spatial patterns of nitrogen runoff from Chinese paddy fields[J].Agriculture, Ecosystems & Environment,2016,231:246-254.

[18] 侯朋福,薛利祥,俞映惊,等.稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1353-1361.

[19] 梅方权,吴宪章,姚长溪,等.中国水稻种植区划[J].中国水稻科学,1988(3):97-110.

[20] Allen R G. Using the fao-56 dual crop coefficient method over an irrigation region as part of an evapotranspiration inter comparison study[J].Journal of Hydrology,2000,229(1/2):27-41.

[21] 魏风英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2 版.北京:气象出版社,2007:43-44.

[22] 吕亚敏,吴玉红,李洪达,等.减肥措施对稻田田面水氮、磷动态变化特征的影响[J].生态与农村环境学报,2018,34(4):349-355.

[23] 杨坤宇,王美慧,王毅,等.不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1723-1734.

[24] 张富林,吴茂前,夏颖,等.江汉平原稻田田面水氮磷变化特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1190-1200.

[25] 董世杰,鲁屹,唐婉莹,等.聚天门冬氨酸钙盐对水稻田面水中三氮动态变化的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):208-213.

[26] 朱利群,田一丹,李慧,等.不同农艺措施条件下稻田田面水总氮动态变化特征研究[J].水土保持学报,2009,23(6):85-89.

[27] Shi X R, Hu K, Batchelor W D, et al. Exploring optimal nitrogen management strategies to mitigate nitrogen losses from paddy soil in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Agricultural Water Management, 2020,228:1-12.

[28] 刘红江,郭智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789.

[29] 王强,姜丽娜,潘建清,等.一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估[J].农业环境科学学报,2019,38(1):168-175.

[30] 薛利红,杨林章,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:源头减量技术[J].农业环境科学学报,2013,32(5):881-888.