



王廷金,时红,才硕,等.灌溉和种植方式对稻田水氮利用及损失的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(3):609–624.
WANG T J,SHI H,CAI S,et al.Effect of irrigation and planting methods on water and nitrogen utilization and loss in paddy fields[J].
Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(3):609–624.

灌溉和种植方式对稻田水氮利用 及损失的影响

王廷金¹,时红^{1,2},才硕^{2*},郭巧玲¹,刘现波¹,程婕²,万绍媛²

(1.东华理工大学 水资源与环境工程学院,江西 南昌 330013;2.江西省灌溉试验中心站,江西 南昌 330201)

摘要:【目的】旨在探究灌溉和种植方式对稻田氮素损失与水分利用的影响特征。【方法】选取手工栽插(HT)、抛秧(ST)、机插(MT)、直播(DS)4种植方式和淹水灌溉(FI)、间歇灌溉(II)2种灌溉模式,开展晚稻大田小区试验,分析评价不同灌溉和种植方式下稻田水量平衡、水分利用效率以及氮素径流淋溶损失特征。【结果】不同灌溉模式的水分利用效率均以间歇灌溉更高,不同种植方式的水分利用效率总体表现由高到低依次为 HT(ST)、MT 和 DS。间歇灌溉模式下各种种植方式处理的灌水量、耗水量、渗漏量、蒸发蒸腾量较淹水灌溉模式分别降低 9.87%~22.11%、9.65%~21.49%、1.46%~3.64%、11.18%~27.15%。种植方式和灌溉模式对氮素径流和淋溶流失量影响较大,其流失量分别占施肥量的 0.02%~0.17% 和 2.33%~3.53%。在相同灌溉模式下,不同种植方式处理的氮素地表径流损失量和淋溶损失量均由大到小依次为 DS、MT、ST 和 HT。受灌溉模式和种植方式的影响,不同处理淋溶量和氮素淋溶损失量在各生育期内存在差异,其中以苗期和分蘖前期损失量较高,占全生育期的比例分别为 43.35%~53.79%、6.67%~22.38%。综合灌溉模式和种植方式,不同处理的产量和水分利用效率均以 HT-II 最高、DS-FI 最低,氮素淋溶损失则以 HT-II 最低、DS-FI 最高。【结论】间歇灌溉有利于提高水稻产量和水分利用效率,直播稻的水分消耗和氮素损失高于移栽稻,手工栽插配合间歇灌溉有利于提高水稻水分利用效率和降低稻田氮素流失。在双季晚稻生产实践中,可通过加强苗期和分蘖前期的水分管理来减少稻田淋溶和氮素的淋溶损失,从而提高稻田的环境效应。

关键词:水稻;全生育期;种植方式;灌溉模式;水分利用效率;氮素损失

中图分类号:S511;S365 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)03-0609-16



Effect of irrigation and planting methods on water and nitrogen utilization and loss in paddy fields

WANG Tingjin¹,SHI Hong^{1,2},CAI Shuo^{2*},GUO Qiaoling¹,
LIU Xianbo¹,CHENG Jie²,WAN Shaoyuan²

(1.College of Water Resources and Environment Engineering, East China University of Technology,
Nanchang 330013, China; 2.Jiangxi Irrigation Test Center, Nanchang 330201, China)

收稿日期:2023-12-28 修回日期:2024-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31960377)和江西水利科技项目(202124ZDKT29、202325ZDKT01、KT201630)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(31960377)and Jiangxi Water Conservancy Science and Technology Project(202124ZDKT29,202325ZDKT01,KT201630)

作者简介:王廷金,硕士生,orcid.org/0009-0006-5572-6062,mei991225@163.com;*通信作者:才硕,研究员,博士,主要从事农田水利与农业生态研究,orcid.org/0000-0001-8384-998x,caishuo0911@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] To explore the effect characteristics of irrigation and planting methods on nitrogen loss and water utilisation in rice fields. [Method] We selected four planting methods: hand-transplanting (HT), seedling throwing (ST), machine-transplanting (MT) and direct seeding (DS), and two irrigation modes: flooding irrigation (FI) and intermittent irrigation (II), and carried out a plot experiment on late rice to analyse and evaluate the characteristics of paddy rice field water balance, water-use efficiency, and nitrogen runoff and leaching loss under different irrigation and planting modes. [Result] The results showed that: the water use efficiency of different irrigation modes was higher in intermittent irrigation, and the water use efficiency of different planting modes was HT (ST) > MT > DS. The water quantity, water consumption, leakage, and evapotranspiration were reduced by 9.87%–22.11%, 9.65%–21.49%, 1.46%–3.64%, and 11.18%–27.15%, respectively, for the treatments of each cropping method under the intermittent irrigation pattern as compared to the flooded irrigation pattern. Planting method and irrigation pattern had a greater impact on nitrogen runoff and leaching loss, which accounted for 0.02%–0.17% and 2.33%–3.53% of the applied fertiliser, respectively. Under the same irrigation pattern, the nitrogen surface runoff loss and leaching loss of different planting treatments were DS > MT > ST > HT. The leaching amount and nitrogen leaching loss of different treatments varied in each fertility period under the influence of irrigation pattern and planting method, among which the loss was higher in seedling and pre-tiller stage, which accounted for the proportion of the whole fertility period, respectively, 43.35%–53.79% and 6.67%. 53.79%, and 6.67%–22.38%, respectively. With the combined irrigation pattern and planting method, the yield and water use efficiency of different treatments were the highest in HT-II and the lowest in DS-FI, while the nitrogen leaching loss was the lowest in HT-II and the highest in DS-FI. [Conclusion] Intermittent irrigation is beneficial to improve rice yield and water use efficiency, water consumption and nitrogen loss of direct seeding rice are higher than that of transplanted rice, and hand-planting with intermittent irrigation is beneficial to improve water use efficiency of rice and reduce nitrogen loss from paddy fields. In the production practice of double-season late rice, the environmental effect of paddy field can be improved by strengthening the water management at seedling and pre-tiller stages to reduce paddy leaching and nitrogen leaching loss.

Keywords: rice; full growth period; planting method; irrigation mode; water use efficiency; nitrogen loss

【研究意义】水稻是我国的基础粮食作物, 1/2 以上的人口都以水稻作为主食^[1]。水氮大量投入的管理模式成为了水稻增产的关键途径, 氮肥的高投入导致了农业面源污染、水体富营养化的现象^[2-3]。农业面源污染中最主要的污染源便是氮素^[4], 稻田中过量的氮素通过地表径流、淋溶液进入河流产生污染^[5]。随着农村精壮劳动力流失, 我国双季稻的种植方式已逐渐从手工栽插转变为直播、机插、抛秧多种种植方式并存^[6-7], 不同种植方式水稻生长状况和温光环境条件不同, 从而使水稻氮素利用与损失程度存在一定差异^[8-10]。因此, 探索水分灌溉和种植方式对水稻全生育期(播种-收割)氮素损失的具体影响程度, 提高关键生育期氮素和水分利用效率, 减少稻田氮素地表径流和淋溶液流失, 降低环境污染, 是保障稻田绿色发展与增产的重要环节。【前人研究进展】太湖流域不同水氮管理的稻作系统中 TN 损失量占施氮量的 5.6%~8.3%^[11], 稻田氮素地表径流和淋溶液损失较早田高达 4 倍以上^[12]。有研究^[13-14]发现节水灌溉除了减少氮素地表径流损失外还降低了氮素淋溶液损失; 杨振宇等^[15]研究认为机插稻比直播稻更有利于降低农田氮素流失风险, 直播稻在播种前和播种后需要确保田面湿润无水层以促进种子萌发, 这就导致产生中大雨时需将水分排出, 进而产生氮素损失, 其稻田氮素径流损失以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 且大于机插稻的损失量^[16]。双季稻中晚稻受水文因素影响较明显^[17], 损失量显著低于早稻^[18-19], 晏维金等^[20]研究表明, 稻田施肥后降雨氮素的流失量是不施肥降雨的 10~30 倍; 施肥后降雨产生径流会增大氮素流失量, 产生降雨时间越接近施肥时间, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 流失比例越高^[21-22]。

【本研究切入点】当前, 学者们多以直播稻和机插稻、直播稻和手工栽插稻、旱直播和湿润直播研究氮素损失规律, 缺乏以上 4 种植方式下稻田氮素损失的系统研究。研究的结果普遍认为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN

淋溶液在淹水灌溉条件下损失量高于间歇灌溉,但水氮管理和种植方式对地表径流和淋溶液的具体影响尚无统一的定论。因此,有必要综合考虑种植方式和灌溉模式,开展稻田水氮利用及损失研究。【拟解决的关键问题】以晚稻作为研究对象,播种至收割为研究时期,探索种植方式和水分管理协同作用下产生的环境效益,为南方粮食主产区节水增产减污提供技术参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与供试品种

本试验于江西省赣抚平原灌区的江西省灌溉试验中心站研究基地(28°26'N, 116°00'E)进行,该地区属亚热带湿润季风性气候。试验晚稻品种为五优华占,属三系杂交迟熟偏早晚稻,生育期 117.5 d 左右。试验田土壤为冲积性黄泥土发育而成的水稻土,试验前土壤(0~20 cm)基本理化性状为:pH 值 6.18,有机质含量 11.25 g/kg,全氮含量 1.41 g/kg,全磷含量 0.23 g/kg,碱解氮含量 127.67 mg/kg,速效磷含量 13.16 mg/kg,速效钾含量 69.40 mg/kg。

1.2 试验设计

采用大田小区试验方法,以播种-收割为研究周期,直播稻直接播种于大田,移栽稻则经过秧田育秧后移栽至大田。设置手工栽插(hand transplanting, HT)、抛秧(seedling throwing, ST)、机插(machine transplanted, MT)、直播(direct seeding, DS)4 种植方式,淹水灌溉(FI)和间歇灌溉(II)2 种灌溉模式。直播稻小区面积 34.5 m²,3 次重复;移栽稻育秧期(3 次重复)HT 小区面积 4.2 m²,ST 和 MT 小区面积 2.4 m²,本田期(3 次重复)每个小区面积 34.5 m²。本田期水稻各生育期小区间筑埂并用塑料薄膜包裹,单独灌排,外部种植与小区相同作物作为隔离带。在育秧期,在各小区均安装铁桩,测量田面水层深度。

1.3 田间管理

试验于 2022 年 6—10 月进行,水稻田间种植管理见表 1。

表 1 水稻田种植管理情况

Tab.1 Management table of paddy field planting

处理 Treatment	播种日期 Sowing date	栽种日期 Planting date	收割日期 Harvest date	播种量/种植密度 Seeding amount	苗数/穴 Number of seedlings	全生育期/d Full birth period
DS-FI	07-18	—	11-07	60 kg/hm ²	—	113
ST-FI	06-28	07-22	10-31	90 万株/hm ²	—	126
MT-FI	06-28	07-22	10-31	26.7 cm×13.3 cm	3	126
HT-FI	06-28	07-22	10-31	26.9 cm×13.3 cm	2	126
DS-II	07-18	—	11-07	60 kg/hm ²	—	113
ST-II	06-28	07-22	10-31	90 万株/hm ²	—	126
MT-II	06-28	07-22	10-31	26.7 cm×13.3 cm	3	126
HT-II	06-28	07-22	10-31	26.9 cm×13.3 cm	2	126

1.3.1 水分管理

水分管理采用传统淹灌晒田的模式,间歇灌溉每次灌水,待田面仅保持湿润无水层再灌水,各小区均设有单独的排水口和水表,水稻移栽后,除水稻分蘖后期晒田一周,以及收获前 10~14 d 小区不进水,其余田间水层控制标准见表 2,当田面水低于 20 mm 时,小区灌水(傍晚进行)。若遇大雨田面水高于 70 mm 时通过排水口排出,认为是径流。

1.3.2 施肥管理

各处理氮肥总量均为 225 kg/hm²,直播稻的运筹为基肥:断奶肥:分蘖肥:穗肥(质量比)=4:2:2:2,机插、抛秧、手工栽插运筹方式为苗肥 45 kg/hm²,本田期用量 180 kg/hm²,运筹方式为基肥:分蘖肥:穗肥(质量比)=4:3:3;小区试验氮肥种类为尿素(N 含量 46.4%);磷肥(P₂O₅)用量为 90 kg/hm²,本田期做基肥一次性施用;钾肥(K₂O)仅在本田期施用,其用量为 180 kg/hm²,运筹方式均为基肥:分蘖肥:穗肥(质量比)=4:3:3。

表 2 田间水层控制标准
Tab.2 Field water layer control standards

灌溉方式 Irrigation method	苗期 seedling stage	分蘖前期 Pretillering stage	分蘖后期 Late tillering	拔节孕穗期 Jointing booting stage	抽穗开花期 Heading and flowering period	成熟期 Maturity
FI	0-20-40	0-20-50	0-20-50 后期晒田	0-20-50	0-20-50	0-30 后期落干
II	0-20-40	0-20-50	0-20-50	0-20-50	0-20-50	0-30
	干 3 d	干 3 d	后期晒田	干 3 d	干 3 d	后期落干

数字表示水层深度,前一位数为灌水下限,中间数为灌水上限,后一位数为蓄水上限。

Number indicate the depth of water layer, the first digit is the lower limit of irrigation, the middle number is the upper limit of irrigation, and the second digit is the upper limit of storage.

移栽稻 6 月 28 日施育秧肥,7 月 21 日移栽并施基肥,7 月 29 日追分蘖肥,8 月 29 日追穗肥;直播稻于 7 月 18 日施基肥,7 月 29 日追施断奶肥,8 月 8 日施分蘖肥,9 月 2 日施穗肥。农药、植保等技术措施与当地保持一致,其他管理措施按当地传统习惯进行。

1.4 样品采集及测定

1.4.1 生育期记载

记载主要生育时期:育秧期(seedling period, SP)、本田期(transplanting to maturing period, HP)、全生育期(whole growth period, WGP);6 个生育期为苗期(seedling stage, SS)、分蘖前期(early tillering period, ETP)、分蘖后期(late tillering period, LTP)、拔节孕穗期(jointing booting stage, JBS)、抽穗开花期(heading and flowering stage, HFS)和成熟期(maturity stage, MS)。

1.4.2 灌溉排水

- (1)耗水量:每天 08:00 观测田间水位。田面有水层时,在每个小区固定位置上,用 ZHD-60 型电测针观测,根据前后日田间水位差值计算小区耗水量;田间无水层时耗水量采用补水法确定。
- (2)灌水量:当田间需要灌水时,记录灌水前后水表读数,用测针测定记录灌水后田间水位。
- (3)排水量:遇到较强降雨,小区需排水时,用测针测定并记录排前与排后田间水位。
- (4)降雨量:通过江西省灌溉试验中心站研究基地气象站获得。

1.4.3 地表径流和淋溶液采集及测定

- (1)淋溶液采集:在秧田和大田试验各个小区施用基肥前埋设土壤溶液取样器(直径 5 cm,高度 100 cm),取样器主体由 PVC 管制成,埋深 80 cm,在埋深 20 cm 处钻一排小孔,小孔上部以及管底部分别用底板密封形成储水室,将输水管穿过底板固定在储水室底部,储水室土壤溶液即为 20 cm 的淋溶液。
- (2)田面径流采集:分别在降雨后田面排水以及育秧肥、基肥、分蘖肥、穗肥施用后采集水样,同时监测径流量并采集径流水样。
- (3)取样频率:施肥后 1 周,每隔 1 d 取样 1 次;第 2 周后,每隔 5~7 d 取样 1 次。总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,硝态氮采用酚二磺酸分光光度法测定,氨态氮采用纳氏试剂分光光度法测定。

1.4.4 产量测定

于成熟期各小区实割 7.2 m²,脱粒、晒干去杂称量,并按照 13.5% 含水量折算实际产量。

1.5 计算公式

1.5.1 稻田水量平衡

$$Z=h_1-h_2+I+P-C \tag{1}$$

式(1)中:Z 为耗水量,mm;h₁ 为当日水深,mm;h₂ 为翌日水深,mm;I 为灌水量,mm;P 为降雨量,mm;C 为排水量,mm。

1.5.2 氮素径流流失量

$$M=\frac{C_n \times V}{1\,000\,000} \times 10\,000 \div S$$
 (2)

式(2)中: M 为氮素径流流失量,kg/hm²; C_n 为径流水氮素浓度,mg/L; V 流失体积,L; S 为小区面积,m²。

1.5.3 蒸发蒸腾量

$$E=Z-Q$$
 (3)

式(3)中: E 为蒸发蒸腾量,kg/hm²; Z 为耗水量,kg/hm²; Q 为渗漏量,kg/hm²。

1.5.4 氮素流失率

$$N=\frac{Z-M}{Z}$$
 (4)

式(4)中: N 为氮素流失率,%; M 为氮素径流流失量,kg/hm²; Z 为施氮量,kg/hm²。

1.5.5 水分利用效率

$$WUE=\frac{Y}{ET}$$
 (5)

式(5)中: WUE 为水分利用效率,kg/m³; Y 为稻谷产量,kg/hm²。

1.5.6 降雨利用率

$$L=(1-\frac{C}{P})\times 100\%$$
 (6)

式(6)中: L 为降雨利用率,mm; C 为排水量,mm; P 为降雨量,mm。

1.6 数据处理与统计分析

采用Excel 2010处理数据,利用SPSS 17.0软件对数据进行方差分析。不同处理之间的多重比较采用最小显著性检验(Duncan's)法,不同小写字母表示达到 $P<0.05$ 显著差异水平。移栽稻的秧田与大田的面积比按照《双季稻优质稻栽培技术规程》(DB36/T 1767—2023)^[23]推荐选取1:70(机插)、1:30(抛秧)、1:8(手工栽插),文中相应指标计算均按照此比例换算。

2 结果与分析

2.1 不同处理对稻田水量平衡的影响

2.1.1 试验年水文状况

晚稻种植期内水文情况如图1所示,试验年出现了“汛期返枯”且偏枯严重的异常现象^[24],试验育秧前期属于早晚稻交界的汛涝末期(6月底),7月后大田生长期属于干旱时期,雨量小且少。试验期间降雨(表3)共10次,形成径流的降雨2次。育秧期间6次,分别发生在育秧肥施用当天、第1、6、8、9(径流)、19(径流)天;大田期间4次,分别在基肥施用后7 d,穗肥施用后第38、39、40天,但由于单次降雨量较少均未产生径流。

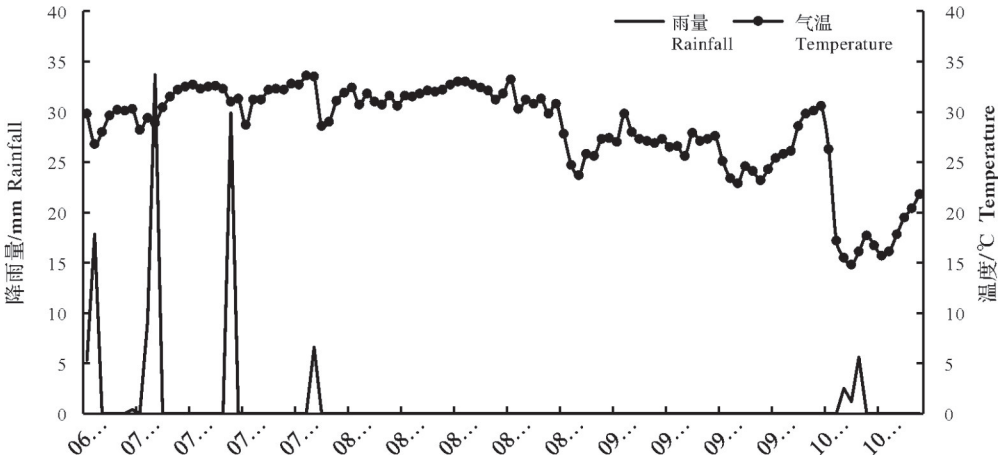


图1 晚稻种植期内水文状况
Fig.1 Rainfall during the growth period of late rice

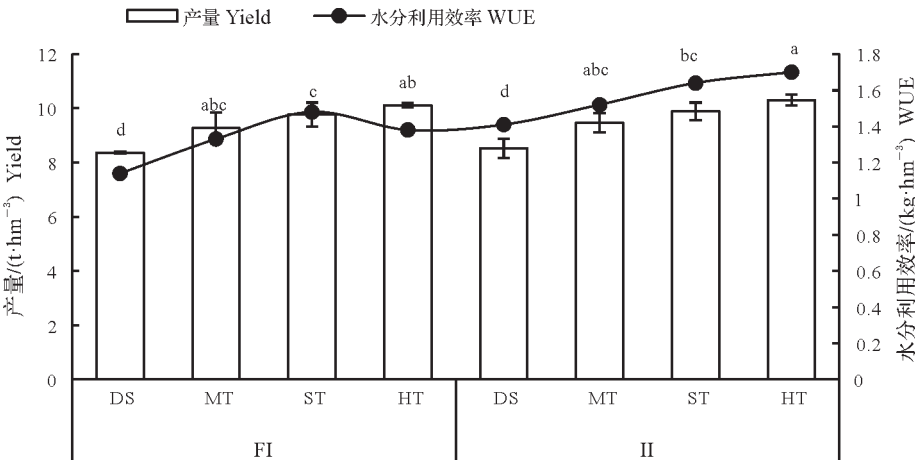
表3 水稻生长期间降雨产生径流情况
Tab.3 Runoff generated by rainfall difference during rice growth

生育期 Reproductive period	降雨日期 Rainfall time	距施肥时间 Distance from fertilization time	降雨量/mm rainfall	产生径流(是/否) Generate runoff
育秧期 Seedling raising period	06-28	育秧肥后 3 h	5.30	0
	06-29	育秧肥后第 1 天	17.80	0
	07-04	育秧肥后第 6 天	0.40	0
	07-06	育秧肥后第 8 天	9.20	0
	07-07	育秧肥后第 9 天	33.70	1
	07-17	育秧肥后第 19 天	29.90	1
本田期 Transplanting to maturing period	07-28	基肥后第 7 天	6.60	0
	10-06	穗肥后第 34 天	2.50	0
	10-07	穗肥后第 35 天	1.20	0
	10-08	穗肥后第 36 天	5.60	0

2.1.2 稻田水量平衡特征

由表4稻田水量平衡表可知,灌水量、耗水量、渗漏量、蒸发蒸腾量均表现为FI>II模式;FI模式下,灌水量、耗水量、蒸发蒸腾量由大到小均表现为DS(HT)、MT和ST,ST的灌水量、耗水量、蒸发蒸腾量较其他处理分别减少了5.3%~11.6%,4.9%~10.9%,6.5%~13.3%;II模式下耗水量和蒸发蒸腾量大小趋势由大到小依次为MT、HT和ST(DS),MT较其他处理的灌水量、耗水量、蒸发蒸腾量显著增多了2.8%~3.5%,2.5%~3.0%,4.2%~11.9%;从表中的育秧期耗水情况可知,FI模式和II模式下的ST、MT和HT耗水量分别占全生育期0.77%、0.29%、2.25%和0.39%、0.23%、1.82%。排水量表现为FI<II模式,直播稻无排水,不同种植方式间由大到小依次为HT、ST和MT,淹水灌溉下HT、ST、MT的排水量较间歇灌溉分别少了4.6%、26.4%、1.1%。

灌溉模式对水稻产量和水分利用效率影响较大(图2),均表现为II>FI模式,8个处理中HT产量最高,HT-II水分利用效率最高。不同灌溉模式之间产量从大到小依次为HT、ST、MT和DS,水分利用效率的变化趋势由高到低依次为ST(或HT)、MT和DS;FI模式和II模式中DS的产量显著低于其他处理最低,MT、ST和HT分别较DS增产10.89%、16.87%、20.93%和11.15%、16.08%、20.89%。方差分析表明,灌溉模式和种植方式对灌水量和蒸发蒸腾量达到显著或极显著水平,灌溉模式对耗水量的影响达显著水平。从交互影响分析可知,种植方式对灌水量、排水量、耗水量、渗漏量、蒸发蒸腾量的影响均为极显著关系;灌溉模式、种植方式和灌溉模式的互作效应极显著影响灌水量、耗水量和蒸发蒸腾量。



ST表示抛秧,MT表示机插,HT表示手工栽插,DS表示直播;FI和II表示淹水灌溉和间歇灌溉,不同小写字母代表处理间在5%水平上差异显著(LSD)($P<0.05$)。

ST means throwing seedlings, MT means machine insertion, HT means manual planting, and DS means live broadcasting; FI and II denote flooded irrigation and intermittent irrigation. Different lowercase letters in the table mean significant difference among treatments at 5%level(LSD)($P<0.05$).

图2 不同处理对产量与水分利用效率的影响
Fig.2 Effect of different treatments on yield and water use efficiency

表 4 不同处理全生育期水量平衡表
Tab.4 Water balance during the whole birth period of different treatments

处理 Treat- ment	降雨量/ mm Rainfall	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)		排水量/(m ³ ·hm ⁻²)		耗水量/(m ³ ·hm ⁻²)		渗漏量/(m ³ ·hm ⁻²)		蒸发蒸腾量/(m ³ ·hm ⁻²)	
		育秧期 Seedling raising	全期 Full period	育秧期 Seedling raising	全期 Full period	育秧期 Seedling raising	全期 Full period	育秧期 Seedling raising	全期 Full period	育秧期 Seedling raising	全期 Full period
DS-FI	159.00	-	7 177.68±63.98 ^a	-	-	-	7 336.68±63.98 ^a	-	1 435.33±30.98 ^a	-	5 901.34±52.64 ^b
ST-FI	191.10	32.36±3.54 ^e	6 434.50±118.18 ^e	13.17±1.94 ^b	13.17±1.94 ^b	51.29±1.94 ^c	6 612.43±120.06 ^c	11.35±0.33 ^b	1 084.01±66.23 ^b	39.95±1.91 ^c	5 528.43±62.24 ^c
MT-FI	172.76	12.83±1.18 ^e	6 773.96±145.21 ^b	6.51±0.30 ^b	6.51±0.30 ^b	20.08±1.38 ^d	6 940.21±145.42 ^b	5.18±1.1 ^c	1 054.18±35.94 ^b	14.90±2.39 ^d	5 886.03±176.43 ^b
HT-FI	279.38	105.63±14.77 ^a	7 135.72±108.74 ^a	60.38±8.95 ^a	60.38±8.95 ^a	165.63±15.34 ^a	7 354.72±112.04 ^a	46.13±0.63 ^a	1 090.13±22.02 ^b	119.50±15.61 ^a	6 264.59±125.95 ^a
DS-II	159.00	-	5 879.98±45.19 ^{de}	-	-	-	6 038.98±45.19 ^d	-	1 397.67±93.04 ^a	-	4 641.32±132.6 ^f
ST-II	191.10	8.43±0.64 ^d	5 856.26±89.44 ^{de}	16.65±1.15 ^b	16.65±1.15 ^b	23.88±1.61 ^d	6 030.71±88.34 ^d	11.29±0.22 ^b	1 058.29±55.35 ^b	12.59±1.66 ^d	4 972.42±125.77 ^e
MT-II	172.76	7.09±0.28 ^d	6 045.47±94.74 ^d	6.58±0.62 ^b	6.58±0.62 ^b	14.27±0.34 ^d	6 211.65±94.24 ^d	5.22±0.20 ^c	1 017.17±7.01 ^b	9.05±0.14 ^d	5 194.48±87.26 ^d
HT-II	279.38	52.78±6.69 ^b	5 843.71±92.03 ^c	63.17±11.67 ^a	63.17±11.67 ^a	109.99±16.98 ^b	6 059.91±102.25 ^d	46.09±1.83 ^a	1 074.42±69.62 ^b	63.90±18.81 ^b	4 985.49±33.27 ^{de}
A(种植 方式)	-	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
B(灌溉 模式)	-	**	**	ns	ns	**	**	ns	ns	**	**
A×B	-	**	**	ns	ns	**	**	ns	ns	**	**

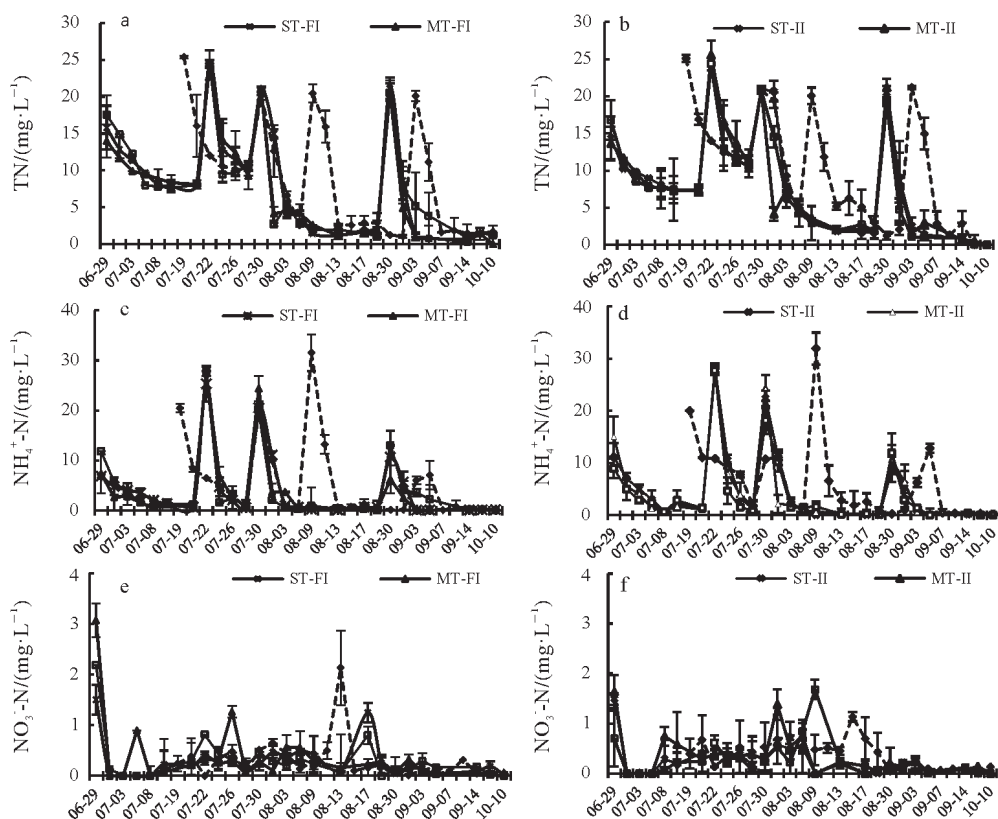
表中数值为平均值±标准差,ST表示抛秧,MT表示机插,HT表示手工栽插,DS表示直播;FI和II表示淹水灌溉和间歇灌溉,表中不同小写字母代表处理间在5%水平上差异显著(LSD)($P<0.05$);*表示因子作用在 $P<0.05$ 水平下达显著水平;**表示因子作用在 $P<0.01$ 水平下达显著水平;ns表示因子作用不显著。

Values in the table are the mean±standard deviation.ST means throwing seedlings,MT means machine insertion,HT means manual planting, and DS means live broadcasting;FI and II denote flooded irrigation and intermittent irrigation.Different lowercase letters in the table mean significant difference among treatments at 5%(level(LSD)($P<0.05$);* indicates that the factor effect is significant at the $P<0.05$ level;** indicates that the factor effect is significant at $P<0.01$ level;ns indicates that the factor effect is not significant.

2.2 不同处理下田面水氮素浓度动态变化特征

移栽稻和直播稻田面水氮素浓度变化特征见图3,移栽稻和直播稻4次施肥,其峰值大小受施用氮肥比例的影响表现出相应的规律(直播稻基肥:断奶肥:分蘖肥:穗肥=4:2:2:2,移栽稻基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3)。不同处理中,移栽稻TN峰值由大到小依次为基肥、分蘖肥、穗肥和育秧肥;直播稻峰值由大到小依次为基肥、育秧肥、分蘖肥和穗肥。

TN浓度变化(图3a和图3b)表明:稻田不同处理TN浓度在肥料施用后1 d田面水TN迅速增加并达到峰值,整个生育期峰值约25 mg/L,不同处理间由高到低顺序依次为MT-II、ST-FI、ST-II(HT-II)、HT-FI和MT-FI,种植方式和灌溉模式对田面水氮素浓度的影响并不显著。施肥后第7天,移栽稻4次施肥处理后的田面水TN浓度分别比第1天减幅为32.61%~54.47%、54.17%~61.87%、76.87%~86.67%和81.26%~96.25%;直播稻在施肥后田面水TN浓度分别比第1天降低了50.64%~58.39%、80.04%~87.41%、75.58%~87.3%和86.63%~93.64%。不同灌溉模式下,不同处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在施肥后1 d出现峰值,1周内保持较高浓度,随后稳定在较低水平浓度; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化(图3e,图3f)与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 大致趋势相似,但具有一定的滞后性,变化速度较缓。



误差线表示 $\pm$ 标准差;ST表示抛秧,MT表示机插,HT表示手工栽插,DS表示直播;FI和II表示淹水灌溉和间歇灌溉。

Error lines indicate the $\pm$ standard deviation; ST means throwing seedlings, MT means machine insertion, HT means manual planting, and DS means live broadcasting; FI and II denote flooded irrigation and intermittent irrigation.

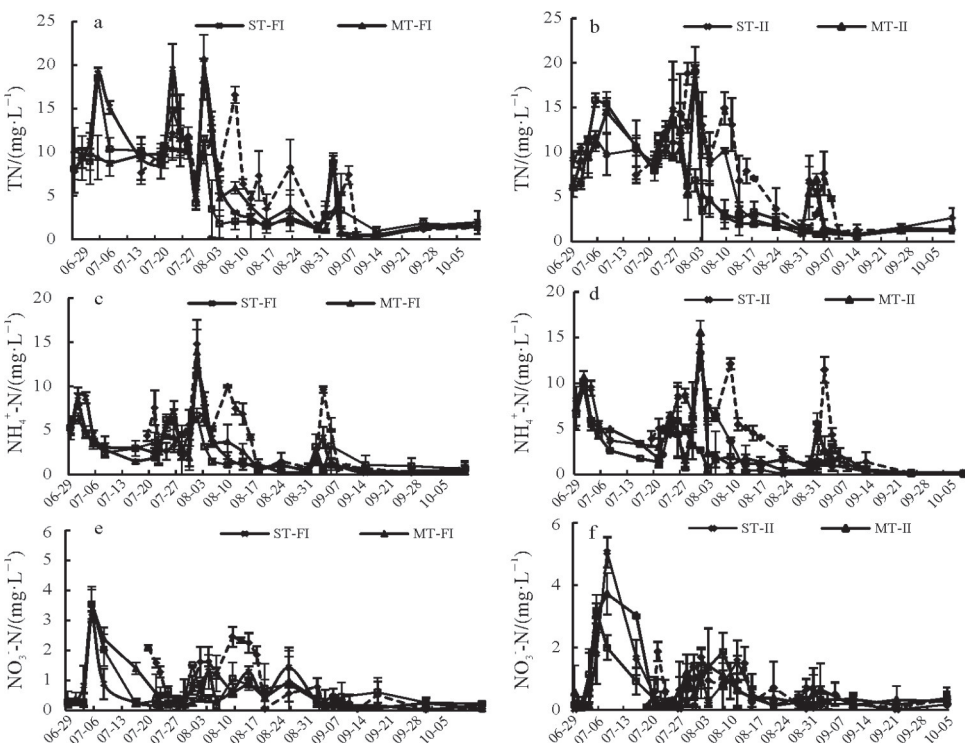
图3 不同处理下稻田氮素动态变化特征

Fig.3 Characteristics of dynamic nitrogen changes in rice fields under different treatments

2.3 土壤淋溶液氮素浓度变化特征

20 cm土壤深度淋溶液氮素损失特征显示见图4,由图4可知,育秧肥施用后不同灌溉模式大小关系表现为FI>II。TN浓度变化(图4a、4b)在4次施肥后的峰值关系由大到小依次为分蘖肥、育秧肥、基肥和穗肥;淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在施肥后3~5 d达到峰值,其峰值浓度为田面水的40%左右(图4c、4d)。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在育秧施肥后1 d的淋溶液中达到最大值,平均浓度为6.32 mg/L;追施分蘖肥时,MT-II处理淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均大于其他施肥时段,分别为27.35 mg/L,较其他处理增幅高1.01~7.24倍、4.31~4.82倍。整个生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均处于较低水平。



误差线表示±标准差;ST表示抛秧,MT表示机插,HT表示手工栽插,DS表示直播;FI和II表示淹水灌溉和间歇灌溉。
Error lines indicate the±standard deviation; ST means throwing seedlings, MT means machine insertion, HT means manual planting, and DS means live broadcasting; FI and II denote flooded irrigation and intermittent irrigation.

图4 20 cm土壤深度淋溶液氮素特征
Fig.4 Nitrogen characteristics of 20 cm soil depth

2.4 稻田氮素流失特征

降雨是产生地表径流的主要原因^[25]。2022年下半年雨水稀少,仅在移栽稻苗期产生地表径流,直播稻无地表径流流失,地表径流流失氮素流失量如表5所示。不同灌溉模式表现为II>FI,不同处理氮素地表径流流失量由大到小分别为HT-II、HT-FI、ST-II、ST-FI、MT-II和MT-FI,分别为385.77,368.03,131.67,112.67,50.13,49.13 g/hm²。FI和II模式下,HT地表径流TN流失量较MT、ST分别高出318.9 g/hm²、255.36 g/hm²(增加7.49倍和3.27倍)和335.64 g/hm²、254.1 g/hm²(增加7.70倍和2.93倍)。方差分析结果表明,种植方式对苗期不同类型氮素地表径流达显著或极显著水平,灌溉模式不显著,而种植方式和灌溉方式的互作效应对NO₃⁻-N与TN的影响呈极显著关系。

表5 苗期稻田地表径流氮素流失量

Tab.5 Surface runoff loss of nitrogen in rice fields during the seedling cultivation period g/hm ²			
处理 Treatment	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
DS-FI	—	—	—
ST-FI	112.67±9.45 ^c	53.67±4.73 ^c	9.67±0.58 ^d
MT-FI	49.13±8.70 ^d	26.37±5.84 ^{de}	8.47±0.67 ^d
HT-FI	368.03±11.90 ^a	127.47±4.74 ^b	19.27±2.54 ^b
DS-II	—	—	—
ST-II	131.67±10.41 ^b	62.00±2.00 ^{cd}	13.63±0.64 ^{bc}
MT-II	50.13±4.90 ^d	30.07±0.12 ^e	10.37±0.29 ^{cd}
HT-II	385.77±8.74 ^a	172.70±8.18 ^a	21.43±4.32 ^a
A(种植方式)	**	**	**
B(灌溉模式)	**	**	*
A×B	ns	**	ns

表中不同小写字母代表处理间在5%水平上差异显著(LSD)($P<0.05$);*表示因子作用在 $P<0.05$ 水平下达显著水平; **表示因子作用在 $P<0.01$ 水平下达显著水平;ns表示因子作用不显著。
Different lowercase letters in the table mean significant difference among treatments at 5%level(LSD)($P<0.05$); * indicates that the factor effect is significant at the $P<0.05$ level; ** indicates that the factor effect is significant at $P<0.01$ level; ns indicates that the factor effect is not significant.

表 6 不同生育期淋溶氮素流失量
Tab.6 Nitrogen loss in the lymph solution during different reproductive periods

kg/hm²

氮素 Inrogen	生育期 Reproductive period	处理 Treatment							
		DS-FI	ST-FI	MT-FI	HT-FI	DS-II	ST-II	MT-II	HT-II
TN	苗期 Seedling stage	3.96±0.72 ^{abc}	4.12±0.11 ^a	3.53±0.46 ^{abc}	3.58±0.51 ^{abc}	3.98±0.47 ^{ab}	3.16±0.35 ^{bcd}	3.13±0.23 ^{cd}	2.46±0.05 ^d
	分蘖前期 Pre-tillering	1.76±0.31 ^a	0.72±0.22 ^b	1.40±0.32 ^a	1.21±0.25 ^a	1.77±0.24 ^a	1.22±0.08 ^a	1.24±0.09 ^a	0.35±0.05 ^b
	分蘖后期 Tillering later	0.83±0.06 ^{de}	1.62±0.13 ^a	1.52±0.25 ^{ab}	1.05±0.05 ^{cd}	0.65±0.14 ^e	1.52±0.06 ^{ab}	1.28±0.25 ^{bc}	1.17±0.09 ^e
	拔节孕穗期 Jointing booting stage	0.78±0.11 ^a	0.66±0.13 ^{ab}	0.59±0.11 ^{ab}	0.46±0.08 ^b	0.74±0.08 ^a	0.66±0.21 ^{ab}	0.80±0.14 ^a	0.45±0.13 ^b
	抽穗开花期	0.23±0.06 ^b	0.28±0.03 ^{ab}	0.29±0.10 ^{ab}	0.52±0.11 ^a	0.35±0.21 ^{ab}	0.33±0.07 ^{ab}	0.45±0.19 ^{ab}	0.45±0.15 ^{ab}
NH ₄ ⁺ -N	Heading and flowering period								
	成熟期 Maturity	0.35±0.14 ^a	0.26±0.05 ^{ab}	0.39±0.07 ^a	0.14±0.03 ^b	0.42±0.12 ^a	0.34±0.12 ^{ab}	0.38±0.10 ^a	0.37±0.10 ^a
	氮素流失量 Nitrogen loss	7.94±1.2 ^a	7.66±0.29 ^a	7.71±1.19 ^a	6.97±0.53 ^a	7.91±0.48 ^a	7.22±0.79 ^a	7.28±0.53 ^a	5.25±0.48 ^b
	苗期 Seedling stage	1.52±0.07 ^{ab}	1.14±0.15 ^{bc}	1.30±0.33 ^{abc}	1.17±0.16 ^{bc}	1.65±0.16 ^a	1.02±0.07 ^c	1.08±0.43 ^{bc}	0.41±0.10 ^d
	分蘖前期 Pre-tillering	0.69±0.10 ^{ab}	0.39±0.03 ^c	0.32±0.05 ^c	0.40±0.01 ^c	0.55±0.05 ^b	0.78±0.15 ^a	0.29±0.01 ^c	0.13±0.03 ^d
NO ₃ ⁻ -N	分蘖后期 Tillering later	0.14±0.05 ^f	0.90±0.09 ^a	0.68±0.15 ^b	0.38±0.03 ^{de}	0.19±0.02 ^d	0.45±0.14 ^{cd}	0.60±0.08 ^{bc}	0.26±0.11 ^{def}
	拔节孕穗期 Jointing booting stage	0.67±0.06 ^a	0.17±0.03 ^e	0.29±0.03 ^{cd}	0.25±0.06 ^{de}	0.57±0.06 ^{ab}	0.21±0.03 ^{de}	0.56±0.09 ^b	0.36±0.03 ^e
	抽穗开花期	0.04±0.01 ^c	0.08±0.02 ^{bc}	0.14±0.06 ^b	0.38±0.08 ^a	0.07±0.07 ^{bc}	0.06±0.02 ^{bc}	0.01±0.01 ^c	0.10±0.02 ^{bc}
	Heading and flowering period								
	成熟期 Maturity	0.13±0.03 ^a	0.07±0.02 ^b	0.08±0.02 ^b	0.06±0.01 ^{bc}	0.04±0.01 ^{cd}	0.02±0.02 ^d	0.01±0.00 ^d	0.03±0.02 ^{cd}
NO ₃ ⁻ -N	氮素流失量 Nitrogen loss	3.19±0.22 ^{ab}	2.75±0.21 ^{ab}	2.81±1.50 ^{ab}	2.64±0.08 ^{ab}	3.07±0.18 ^{ab}	2.52±0.08 ^b	2.56±0.44 ^b	1.30±0.22 ^c
	苗期 Seedling stage	0.43±0.07 ^a	0.27±0.11 ^b	0.42±0.03 ^a	0.26±0.04 ^b	0.28±0.03 ^b	0.31±0.09 ^a	0.28±0.02 ^b	0.26±0.05 ^b
	分蘖前期 Pre-tillering	0.33±0.06 ^a	0.01±0.00 ^f	0.03±0.01 ^c	0.05±0.01 ^c	0.19±0.06 ^b	0.02±0.01 ^e	0.05±0.02 ^c	0.01±0.00 ^e
	分蘖后期 Tillering later	0.24±0.05 ^{ab}	0.30±0.01 ^a	0.15±0.08 ^{bc}	0.18±0.04 ^{abc}	0.09±0.01 ^c	0.18±0.02 ^{abc}	0.18±0.14 ^{abc}	0.17±0.04 ^{bc}
	拔节孕穗期 Jointing booting stage	0.05±0.01 ^d	0.08±0.01 ^{bcd}	0.12±0.03 ^a	0.10±0.02 ^{abc}	0.05±0.01 ^d	0.12±0.03 ^{ab}	0.06±0.02 ^{cd}	0.10±0.02 ^{abc}
NO ₃ ⁻ -N	抽穗开花期								
	Heading and flowering period								
	成熟期 Maturity	0.01±0.01 ^e	0.04±0.01 ^{cd}	0.05±0.02 ^{bc}	0.13±0.03 ^a	0.02±0.01 ^{de}	0.03±0.01 ^{cd}	0.06±0.01 ^{bc}	0.07±0.02 ^b
	氮素流失量 Nitrogen loss	0.03±0.02 ^{bc}	0.05±0.03 ^{abc}	0.03±0.02 ^c	0.03±0.01 ^c	0.08±0.01 ^a	0.02±0.01 ^e	0.07±0.01 ^a	0.06±0.02 ^{ab}
	拔节孕穗期 Jointing booting stage	1.09±0.21 ^a	0.76±0.14 ^b	0.80±1.09 ^b	0.75±0.09 ^b	0.71±0.09 ^b	0.69±0.03 ^b	0.69±0.16 ^b	0.68±0.07 ^b

表中不同小写字母代表处理间在 5% 水平上差异显著 (LSD) ($P<0.05$)。
Different lowercase letters in the table mean significant difference among treatments at 5% level (LSD) ($P<0.05$).

不同生育期淋溶液氮素流失量(表6)表明,不同种植方式下氮素淋溶液流失量表现为FI>II模式;不同灌溉方式下,氮素流失量由大到小依次为DS、MT、ST和HT;FI和II模式下,DS的TN流失量较MT、ST、HT分别高了0.23、0.28、0.97 kg/hm²(增幅2.98%~13.92%) and 0.77、0.71、2.66 kg/hm²(增幅10.58%~50.67%)。直播稻FI和II模式苗期氮素淋溶液流失量显著高于移栽稻,分别为7.94、7.91 kg/hm²。FI模式下NH₄⁺-N和NO₃⁻-N较TN损失量少了4.16~4.91 kg/hm²、4.91~6.85 kg/hm²,II模式NH₄⁺-N和NO₃⁻-N较TN损失量少了3.95~4.84 kg/hm²、4.57~7.20 kg/hm²。不同生育期淋溶液大小关系为苗期>分蘖前期(后期)>拔节孕穗期、抽穗开花期、成熟期。

3 讨 论

3.1 灌溉和种植方式对水量和水分利用效率的影响

不同种植方式的水分管理方式不同,水稻生育期及生长差异导致稻田生长条件不同,从而构成水稻产量水平和水分利用效率的差异^[26-29]。本试验研究表明,不同灌溉模式下产量由大到小均为手工栽插或抛秧、机插和直播,直播稻苗期时间较长,水分消耗显著高于移栽稻(机插、抛秧、手工栽插),产量大小规律基本不受灌溉模式的影响,而水分利用效率受灌溉模式影响显著。本试验选择间歇灌溉模式严格控制田间水层高度,定期落干,在限制水分输入的同时降低了田间渗漏、蒸发蒸腾量和耗水量进而显著增大不同种植方式的水分利用效率,但受极端干旱气候的影响,导致稻田排水仅局限于育秧期间,大田期间的地表径流和水分利用效率受不同水文年型的影响还有待研究。郑世宗等^[30]研究了枯水年水分利用情况,相比淹水灌溉模式,间歇灌溉模式水量高出12.69%,需水量和耗水量分别增加了1.2%、0.9%,渗漏量、蒸发蒸腾量和耗水量减少了43.8%、14.4%、17.6%,产量增加1.7%,与本试验研究结论一致,但未开展不同种植方式下的水分特性研究。不同种植方式投入成本、生长状况等的不一致,使双季稻产量产生了差异,伍丹丹^[31]探讨了不同种植方式下双季稻的产量特性,并认为晚稻季产量由大到小依次为手工栽插、机插和直播,郭振华^[32]研究认为手工栽插产量高于机插稻,张金才^[33]研究了轻简化栽培方式下直播稻与机插稻的生长特性后表明直播稻生育期长于机插稻且产量低于机插,本试验在得出一致结果的基础上,还认为机插稻产量仍低于手工栽插;但也有学者认为不同种植方式产量由大到小依次为直播、手工栽插和机插^[34],陶冶^[35]研究指出湿直播产量显著高于手工栽插,旱直播与手工栽插产量无显著差异,这可能与水稻育秧期水分控制差异和后期水分管理差异较大有关。相关学者提出,间歇灌溉能够较好的提高稻田水分利用效率^[36-37],这在本试验结果中得到了进一步验证,在保证产量的同时,为减轻农田面源污染、降低富营养化起着促进作用。

3.2 不同灌溉和种植方式对稻田氮素时空变化特征的影响

针对稻田氮素地表径流流失和淋溶液流失特征,试验结果显示间歇灌溉模式田面水NH₄⁺-N大于淹水灌溉,4次追肥TN浓度峰值由大到小依次为基肥、分蘖肥、穗肥和育秧肥,NH₄⁺-N浓度峰值由大到小依次为基肥、分蘖肥和穗肥(或育秧肥);育秧肥施用后2周水体氮素缓慢下降至稳定准状态,基肥和穗肥施用后1周氮素浓度急剧下降,这与周文涛等^[38]和霍中洋等^[39]植株氮素积累特征相对应;金洁等^[40]研究指出施肥后次日田面水NH₄⁺-N、TN浓度明显升高,随着时间推移在7~10 d快速下降,硝态氮含量远远低于NH₄⁺-N,这与本试验结论趋于一致,但是缺少不同种植方式和灌溉模式下的对比分析;时红等^[10]对相同试验区平水年的水氮损失特征开展了研究,结果表明不同种植方式下氮素损失量在11.58~15.37 kg/hm²,手工栽插显著提高了氮素利用率。识别水文因素影响下稻田氮素流失特性可以更高效的控制农业面源污染。从时红等^[10]的水氮损耗及利用来看,试验年不同处理较平水年氮素排放量减少了4.13~9.53 kg/hm²,但水分利用效率的值仅为0.01~0.05 kg/m³。由此可见,稻田氮素流失不仅受种植方式和灌溉模式影响,更受到水文气象因素的影响。水文情况显著影响稻田氮素排放量,稻田排水量和总氮排放量呈正相关关系,枯水年排水量少,总氮排放量降低,水分消耗量增加。干旱气候会增加灌溉用水,减少地表径流,从而减少氮素地表径流流失。由于本试验仅开展了一季晚稻,且水稻生长期出现了“汛期返枯”且偏枯严重的异常现象,引起了稻田排水的时空差异,导致了移栽稻本田期和直

播稻全生育期均未产生氮素径流损失,这也造成了本试验结果的局限性,但从干旱少雨的角度出发也得到一些启示,即在易发生季节性干旱的晚稻种植区,通过合理的灌溉模式可实现稻田水氮的高效利用和节水减排。

3.3 灌溉和种植方式对稻田氮素地表流失和淋溶液流失特征

种植和灌溉方式对稻田同一时期氮素浓度影响较小,但是对氮素流失量影响较大。这是由于种植和灌溉方式的不同使得水稻各生长期出现差异,从而对水文条件的需求产生差异^[9]。降雨和施肥时间是氮素浓度变化快慢的关键因素^[41-43],而地表径流流失和淋溶液流失是氮素水体损失多少的主要途径^[44-45]。本研究中,苗期施肥后的降雨使得不同处理氮素浓度峰值降低,氮素地表径流流失量增加,这在王冉等^[46]模拟降雨条件下的氮素流失特性研究结论中得到了验证。

降雨量较少时,田面氮素损失降低,主要以淋溶液渗漏损失为主^[47-48],主要原因是田埂构成了稻田独立的体系,只有发生强降雨,超过稻田储水量时才需要对田面进行排水,进而产生地表径流^[49-50]。Yang等^[51]研究表明稻田氮素损失量在14~48 kg/hm²,占氮素输入量的13.1%~31.7%;胡泽友等^[52]研究发现稻田附近水体氮素富营养化率为64%。黄思怡^[53]研究指出晚稻氮素损失量较早稻减少了6.71%~11.33%;尹娟等^[54]研究表明手工栽插稻淋失的氮素占施氮量0%~50%,灌溉引起的淋失量达施氮量13%~100%;柯健等研究表示机插稻的氮素损失量可达到施肥量的0.8%~3.1%。本试验期间降雨量较少,氮素主要以淋溶液渗漏损失为主,不同处理全生育期淋溶氮素损失量为4.7~8.09 kg/hm²,占施肥量2.09%~3.60%,这与前人研究认为淋溶氮素损失占施肥量2%左右的结论一致^[55-56]。田面地表径流时间越接近施肥时间,地表径流流失水中氮素浓度越高,氮素地表流失量越高,若施肥1周后才发生地表径流,则氮素流失量相对较小,这与李娟^[57]的研究结果类似。因此,应该控制生育期节点和施肥后1周的田面水位,以减少外排。

4 结 论

间歇灌溉可显著的降低灌水量、耗水量、渗漏量和蒸发蒸腾量,提高稻田水分利用效率。不同种植方式处理的产量和水分利用效率由大到小均为HT(或ST)、MT和DS。综合灌溉模式和种植方式,HT-II处理的产量和水分利用效率均为最高及氮素淋溶损失最低,DS-FI处理的水分利用效率最低且水氮流失最为严重。

不同处理田面水TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N浓度在施肥后即达到峰值,施肥后6~8 d趋于稳定;移栽稻氮素浓度峰值由大到小均依次为基肥、分蘖肥、穗肥和育秧肥,直播稻氮素浓度峰值由大到小均依次为基肥、断奶肥、分蘖肥和穗肥。不同处理育秧肥、基肥分蘖肥、穗肥施用后稳定值的氮素浓度分别为峰值的44.39%~63.38%,38.13%~45.83%,7%~17.0%,3.75%~18.74%。

不同灌溉和种植方式下,稻田氮素流失量差异显著,而田面水氮素浓度差异不显著。不同处理地表径流氮素流失大小关系为II>FI,HT>ST>MT。不同灌溉模式下,淹水灌溉的氮素淋溶损失大于间歇灌溉,且不同种植方式的由大到小顺序为DS、MT、ST和HT。不同处理淋溶量和氮素淋溶损失量在各生育期内存在差异,其中以苗期和分蘖前期损失量较高,占全生育期的比例分别为43.35%~53.79%、6.67%~22.38%。

综合考虑灌溉模式和种植方式,直播稻的水分消耗和氮素损失高于移栽稻,间歇灌溉有利于提高水稻产量、水分利用效率及降低氮素淋溶流失。手工栽插协同间歇灌溉模式的稻田水氮利用最优,而淹水灌溉下的直播方式水氮流失最为严重。双季晚稻可以通过优化种植方式和加强苗期、分蘖前期的水分管理提高稻田环境效应。

致谢:长江科学院开放研究基金(CKWV2016400/KY)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

[1] 龙坤红.水稻超高产生理特性与栽培技术探讨[J].农业与技术,2014,34(8):104.

LONG K H. Discussion on the physiological characteristics and cultivation technology of rice with ultra-high yield [J]. Agri-

- culture & technology, 2014, 34(8): 104.
- [2] 石丽红, 纪雄辉, 李洪顺, 等. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 551-557.
SHI L H, JI X H, LI H S, et al. Nitrogen and phosphorus losses from surface runoff under different application in the double cropping rice fields in Hunan[J]. Agrometeorology in China, 2010, 31(4): 551-557.
- [3] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89.
ZUO H J, ZHANG Q, XU L G. Study on the factors influencing nitrogen leaching loss from farmland and controlling measures [J]. Environmental pollution and prevention, 2008, 30(12): 83-89.
- [4] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.
ZHANG W L, XU A G, JI H J, et al. Agricultural non-point source pollution situation estimation and control countermeasures in China[J]. Agricultural science in China, 2004, 37(7): 1026-1033.
- [5] 徐玉宏. 氮肥污染与防治[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 174-175.
XU Y H. Nitrogen fertilizers pollution and its prevention[J]. Environmental pollution and control, 2002, 24(3): 174-175.
- [6] 刘现波, 才硕, 时红, 等. 种植方式变化下双季稻田水氮流失与调控研究概述[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 17-23.
LIU X B, CAI S, SHI H, et al. Research overview on water and nitrogen loss and regulation in double-cropping paddy fields under the changing planting methods[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2023, 51(13): 17-23.
- [7] 王在满, 张明华, 郑乐, 等. 不同播种方式对直播水稻产量形成的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(4): 601-606.
WANG Z M, ZHANG M H, ZHENG L, et al. Effects of different seeding methods on yield formation of direct seeding rice[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis 2016, 38(4): 601-606.
- [8] 才硕, 时红, 时元智, 等. 种植方式变化下双季稻田氮素平衡及环境效应研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(17): 1-3.
CAI S, SHI H, SHI Y Z, et al. Research progress on nitrogen balance and environmental impact under the change planting patterns in double-cropping paddy fields[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2020, 48(17): 1-3.
- [9] 张志剑, 王兆德, 姚菊祥, 等. 水文因素影响稻田氮磷流失的研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1789-1794.
ZHANG Z J, WANG Z D, YAO J X, et al. Effects of hydrological practices on nutrients export from paddy field: a review[J]. Ecology and environment, 2007, 16(6): 1789-1794.
- [10] 时红, 才硕, 孙占学, 等. 种植方式对稻田水肥利用及环境效应的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 229-235.
SHI H, CAI S, SUN Z X, et al. Effect of planting methods on water-fertilizer utilization and environmental impact in paddy fields[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(17): 229-235.
- [11] TIAN Y H, YIN B, YANG L Z. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake Region, China [J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 445-456.
- [12] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000(4): 188-193.
SI Y B, WANG S Q, CHEN H M. Loss of nitrogen and phosphorus from farmland and eutrophication of water bodies [J]. Soils, 2000(4): 188-193.
- [13] 朱成立, 张展羽. 灌溉模式对稻田氮磷损失及环境影响研究展望[J]. 水资源保护, 2003, 19(6): 56-58.
ZHU C L, ZHANG Z Y. Influence of irrigation mode on the loss of nitrogen and phosphorus in rice fields and environment [J]. Water resources protection, 2003, 19(6): 56-58.
- [14] 谭学志. 节水灌溉稻田水氮迁移转化机理及模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
TAN X Z. Mechanism and simulation of water and nitrogen transfer and transformation in water-saving irrigated rice field [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [15] 杨振宇, 罗功文, 赵杭, 等. 种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1529-1537.
YANG Z Y, LUO G W, ZHAO H, et al. Effects of planting patterns on ammonia volatilization and nitrogen and phosphorus loss in paddy fields[J]. Journal of agro-environment science, 2021, 40(7): 1529-1537.
- [16] 乔月, 朱建强, 吴启侠, 等. 不同氮肥对不同种植方式稻田径流氮流失与氨挥发的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 32-41.
QIAO Y, ZHU J Q, WU Q X, et al. Nitrogen loss from surface runoff and ammonia volatilization from paddy field as impacted by different fertilizers and planting methods[J]. Journal of irrigation and drainage, 2021, 40(2): 32-41.
- [17] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32

- (3):21-28.
- TIAN C,ZHOU X,XIE G X,et al.Effects of controlled-release urea application on dynamics and loss of nitrogen in runoff and yield in double-rice cropping field[J].2018,32(3):21-28.
- [18] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田氮挥发损失和氮肥利用率的影响[J].中国水稻科学,2018,32(4):387-397.
- TIAN C,ZHOU X,XIE G X,et al.Ammonia volatilization loss and nitrogen use efficiency in double-cropping rice field as affected by decreasing controlled-release urea application level[J].Chinese journal of rice science,2018,32(4):387-397.
- [19] 侯坤,荣湘民,韩磊,等.速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(9):1923-1934.
- HOU K,RONG X M,HAN L,et al.Effects of one-time deep application of available nitrogen and slow and controlled-release nitrogen on rice yield,nitrogen use efficiency,and nitrogen loss[J].2021,40(9):1923-1934.
- [20] 晏维金,尹澄清,孙濮,等.磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J].应用生态学报,1999,10(3):312.
- YAN W J,YIN C Q,SUN P,et al.Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake[J].Chinese journal of applied ecology,1999,10(3):312.
- [21] QIAO J,YANG L Z,YAN T M,et al.Rice dry matter and nitrogen accumulation,soil mineral N around root and N leaching,with increasing application rates of fertilizer[J].European journal of agronomy,2013,49:93-103.
- [22] 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,2007,26(4):495-500.
- JIAO S J,HU X M,PAN G X,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,2007,26(4):495-500.
- [23] 江西省农业农村厅.双季优质稻栽培技术规程:DB36/T 1767—2023[S].南昌:江西省市场监督管理局,2023.
- Jiangxi Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs.Technical regulations for cultivation of double-season high-quality rice:DB36/T 1767—2023[S].Nanchang:Jiangxi Provincial Administration for Market Regulation,2023.
- [24] 张明波,熊丰,王栋.2022年长江流域汛期枯水情势分析[J].人民长江,2023,54(4):1-6.
- ZHANG M B,XIONG F,WANG D.Analysis on low water regime during flood season in Yangtze River Basin in 2022[J].Yangtze river,2023,54(4):1-6.
- [25] 邓秋宏,樊敏,朱静平.稻田排水晒田及降雨径流的氮素流失特征[J].湖北农业科学,2022,61(20):17-22.
- DENG Q H,FAN M,ZHU J P.Characteristics of nitrogen loss from drainage and runoff in paddy field and rainfall runoff[J].Hubei agricultural sciences,2022,61(20):17-22.
- [26] 康佩章,张瑞根.机插水稻的生育特性与栽培技术[J].现代农业科技,2008(24):197.
- KANG P Z,ZHANG R G.Growth characteristics and cultivation techniques of machine-inserted rice[J].Modern agricultural science and technology,2008(24):197.
- [27] 曾海泉,叶永青,王日芳,等.水稻不同插植方式对比研究[J].广东农业科学,2011,38(10):14.
- ZENG H Q,YE Y Q,WANG R F,et al.Comparative study on different planting methods of rice[J].Guangdong agricultural sciences,2011,38(10):14.
- [28] 朱芬芳.晚稻不同栽培方式对比试验研究[J].现代农业科技,2011(6):66.
- ZHU F F.Comparative experimental study on different cultivation methods of late rice[J].Modern agricultural science and technology,2011(6):66.
- [29] 陈少杰.早稻机插栽培与抛秧、手插栽培的比较试验[J].浙江农业科学,2012(4):463-464.
- CHEN S J.Comparative experiment of early rice machine planting,seedling throwing and hand planting[J].Zhejiang agricultural sciences,2012(4):463-464.
- [30] 郑世宗,肖梦华.不同灌溉模式下常规稻与杂交稻生长及水分利用的差异性分析[J].灌溉排水学报,2023,42(10):1-8.
- ZHENG S Z,XIAO M H.Differences irrigation modes variance analysis in growth and water use between conventional and hybrid rice[J].Journal of irrigation and drainage,2023,42(10):1-8.
- [31] 伍丹丹.种植方式对早晚兼用双季稻生长发育、产量及品质的影响[D].长沙:湖南农业大学,2015.
- WU D D.Effects of different planting methods on growth and development,yield and quality of early-late season cultivars in double cropping rice[D].Changsha:Hunan Agricultural University,2015.

- [32] 郭振华. 机插与手栽稻生长发育、产量及品质差异的比较研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
GUO Z H. Differences on growth, yield and grain quality of rice transplanted by rice transplanter and hand [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.
- [33] 张金才. 不同种植方式对水稻生长的影响研究[J]. 种子科技, 2019, 37(1): 118-120.
ZHANG J C. Effects of different planting methods on rice growth [J]. Seed technology, 2019, 37(1): 118-120.
- [34] 厉波, 曹当阳. 不同种植方式对黔东南水稻土壤养分及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 64-67.
LI B, CAO D Y. Effects of different planting methods on soil nutrients and yield of rice in southeast Guizhou Province [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(5): 64-67.
- [35] 陶冶. 不同种植方式下水稻产量、水氮利用效率及稻田温室气体排放比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
TAO Y. Comparison among different rice establishment methods: grain yield, water and nitrogen utilization efficiencies and greenhouse gas emissions [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [36] 邱佳慧, 刘博懿, 靳伟荣, 等. 不同灌溉模式对水稻耗水量及产量的影响[J]. 江西水利科技, 2021, 47(5): 313-316.
QIU J H, LIU B Y, JIN W R, et al. Effects of different irrigation modes on water consumption and yield of rice [J]. Jiangxi water science and technology, 2021, 47(5): 313-316.
- [37] 徐大伟, 刘佳. 不同生育期浅湿灌溉对水稻生长发育和水分利用效率的影响[J]. 治淮, 2022(8): 106-108.
XU D W, LIU J. Effects of shallow wet irrigation at different growth stages on growth and water use efficiency of rice [J]. Tame the Huai River, 2022(8): 106-108.
- [38] 周文涛, 龙文飞, 戴炜, 等. 节水条件下不同种植方式对晚稻氮素吸收积累的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(3): 147-154.
ZHOU W T, LONG W F, DAI W, et al. Effects of different planting modes on nitrogen uptake and accumulation of late rice under water-saving conditions [J]. Acta agriculturae boreali-Sinica, 2019, 34(3): 147-154.
- [39] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 等. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1908-1919.
HUO Z Y, LI J, ZHANG H C, et al. Characterization of nitrogen uptake and utilization in rice under different planting methods [J]. Acta agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1908-1919.
- [40] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 357-361.
JIN J, YANG J P, SHI H X, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field [J]. Journal of agro-environment science, 2005, 24(2): 357-361.
- [41] 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5047-5055.
LIAN H S, LIU H B, LI X D. Characteristics of nitrogen variation and its response to rainfall: a case study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin [J]. Environmental science, 2017, 38(12): 5047-5055.
- [42] 李佳韵, 童菊秀, 夏传安, 等. 降雨条件下农田氮素地表径流流失特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 8-15.
LI J Y, TONG J X, XIA C A, et al. Experiments study on farmland nitrogen loss to surface runoff under rainfall condition [J]. Journal of irrigation and drainage, 2016, 35(7): 8-15.
- [43] 张小磊, 裴颖春, 夏长会, 等. 黄河下游典型潮土区玉米地径流氮素流失特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 113-121.
ZHANG X L, PEI Y C, XIA C H, et al. Characteristics of nitrogen loss from corn field surface runoff in typical fluvo-aquic soil area of the lower reaches of the Yellow River [J]. Research of soil and water conservation, 2023, 30(5): 113-121.
- [44] DENG L Z, SUN T Y, FEI K, et al. Coupling loss characteristics of N-P-C through runoff and sediment in the hilly region of SE China under simulated rainfall [J]. Environmental science and pollution research international, 2021, 28(28): 37204-37216.
- [45] FENG L Q, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of grass density on the runoff hydraulic characteristics and sediment yield in gully headcut erosion processes [J]. Journal of hydrology, 2006, 331(1/2): 178-185.
- [46] 王冉, 童菊秀, 李佳韵, 等. 模拟降雨条件下农田裸地氮素随地表径流流失特征[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 37-42.
WANG R, TONG J X, LI J Y, et al. Characteristics of nitrogen loss in surface runoff of farmland under simulated rainfall conditions [J]. Rural water conservancy and hydropower in China, 2018(5): 37-42.
- [47] 赵经华, 杨庭瑞, 胡文军, 等. 水氮互作对滴灌小麦土壤硝态氮运移、氮平衡及水氮利用效率的影响[J]. 中国农村水

- 利水电, 2021(4): 141-149.
- ZHAO J H, YANG T R, HU W J, et al. Effects of water and nitrogen interaction on nitrate transport, nitrogen balance and water and nitrogen use efficiency of wheat soil under drip irrigation [J]. *Rural water conservancy and hydropower*, 2021(4): 141-149.
- [48] 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.
- [49] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 97-102.
- CAO Z H, LIN X G, YANG L Z. On the function of “rice field circle” in protecting urban and rural ecological environment I. Characteristics of runoff, migration and loss of soil phosphorus in rice field [J]. *Acta pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 97-102.
- [50] 耿芳, 刘连华, 欧阳威, 等. 长江流域典型单季稻田水文及氮素流失特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(1): 132-141.
- GENG F, LIU L H, OU Y W, et al. Hydrology and nitrogen loss characteristics of a typical rice paddy field in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of agro-environment science*, 2023, 42(1): 132-141.
- [51] YANG S H, PENG S Z, XU J Z, et al. Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields [J]. *Paddy and water environment*, 2015, 13(1): 71-80.
- [52] 胡泽友, 郭朝晖, 周作明, 等. 湖南省稻田化肥施用与氮磷流失状况的研究 [J]. *湖南农业大学学报*, 2000, 26(4): 264-266.
- HU Z Y, GUO C H, ZHOU Z M, et al. Application of chemical fertilizer and the loss of nitrogen and phosphorus in paddy soils in Hunan [J]. *Journal of Hunan agricultural university*, 2000, 26(4): 264-266.
- [53] 黄思怡. 不同施肥模式对双季稻氮磷养分损失的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- HUANG S Y. Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss in double-cropping rice [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.
- [54] 尹娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 189-191.
- YIN J, FEI L J, TIAN J C, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2005, 21(6): 189-191.
- [55] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(4): 629-636.
- HUANG M W, LIU M, LU M, et al. Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2007, 27(4): 629-636.
- [56] 张美良, 刘经荣, 吴建富, 等. 不同施肥结构对稻田氮素循环和能量流动影响的分析 [J]. *江西农业大学学报(自然科学)*, 2003, 25(4): 501-504.
- ZHANG M L, LIU J R, WU J F, et al. Analysis of effects of different fertilization structure on nitrogen cycling and energy flow in rice fields [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis (natural sciences edition)*, 2003, 25(4): 501-504.
- [57] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- LI J. Effects of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorus losses from paddy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.