

长江流域典型单季稻田间水文及氮素流失特征

耿芳, 刘连华, 欧阳威, 朱建强

引用本文:

耿芳, 刘连华, 欧阳威, 朱建强. 长江流域典型单季稻田间水文及氮素流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 132-141.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0287>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 侯朋福, 徐德福, 杨林章

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2761-2769 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397>

江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征

陈玲, 范先鹏, 黄敏, 刘冬碧, 吴茂前, 夏颖, 张富林, 张志毅, 倪承凡, 程子珍

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1520-1530 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1397>

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

杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723-1734 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609>

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558-1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响

祁茜, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 高晓瑜, 范理权, 郝云凤

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 559-567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0840>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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, OUYANG 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.



开放科学 OSID

长江流域典型单季稻田水文及氮素流失特征

耿芳¹, 刘连华^{1*}, 欧阳威^{1,2}, 朱建强³

(1. 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境与生态前沿交叉研究院, 广东 珠海 519087; 3. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434025)

摘要:为探究稻田水文和氮素流失特征以及二者之间的关系,以我国三大水稻主产区之一的长江流域稻作区典型单季稻田为对象,开展田间尺度多因子水分与氮素流失原位动态监测。结果表明:田面水位高度主要受降雨和灌溉的影响,田间水肥管理是不同深度土壤含水量、田面水和土壤水中氮素浓度动态变化的主要影响因素。地表径流流失是平水年稻田氮素流失的主要途径,整个生育期内流失量为 $8.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;渗漏流失是枯水年稻田氮素流失的主要途径,整个生育期内流失量为 $4.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。返青期是氮素渗漏流失的关键生育期,平水年和枯水年该时期渗漏流失量分别为 $1.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;分蘖期和拔节孕穗期是氮素地表径流流失的关键生育期,平水年和枯水年这两个时期地表径流流失量分别为 $7.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。稻田水文与氮素流失之间密切相关,田面水位动态变化可以影响稻田渗漏水量和地表径流量,进而影响稻田氮素流失量。研究表明,应避免水稻生育前期(返青期、分蘖期和拔节孕穗期),特别是施肥后一周内田面水的外排;合理提高稻田排水水位,增加稻田水容量,从而减少氮素流失。

关键词:稻田;面源污染;氮素流失;水文特征

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0132-10 doi:10.11654/jaes.2022-0287

Hydrology and nitrogen loss characteristics of a typical rice paddy field in the Yangtze River basin

GENG Fang¹, LIU Lianhua^{1*}, OUYANG Wei^{1,2}, ZHU Jianqiang³

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China; 3. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: To investigate the hydrology and nitrogen loss characteristics of paddy fields and the relationship between them, *in situ* monitoring of field-scale multifactor water and nitrogen loss dynamics was carried out in a typical single rice paddy field in the Yangtze River basin, one of the three major rice planting areas in China. Results showed that field ponding water depth was mainly influenced by rainfall and irrigation. Water and fertilizer management were the main influencing factors for the dynamic changes of soil water content at different depths and nitrogen concentrations in field ponding water and soil water. Surface runoff loss was the main pathway of nitrogen loss from paddy fields in a normal year, with a loss of $8.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the rice growing season. Leaching loss was the main pathway of nitrogen loss from paddy fields in a dry year, with a loss of $4.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the rice growing season. The recovering stage was the critical risk stage for nitrogen leaching loss, with a loss of $1.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $2.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in normal and dry years, respectively; the tillering and jointing-booting stages were the most critical risk stages for nitrogen surface runoff loss, with a loss of $7.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively.

收稿日期:2022-03-25 录用日期:2022-06-07

作者简介:耿芳(1999—),女,云南曲靖人,硕士研究生,从事流域水环境研究。E-mail:202121180038@mail.bnu.edu.cn

*通信作者:刘连华 E-mail:liulianhua@bnu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(U21A2039,42107394);中国博士后科学基金项目(2020M680432)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(U21A2039,42107394); China Postdoctoral Science Foundation(2020M680432)

There was a close correlation between paddy field hydrology and nitrogen loss. Changes in the dynamics of field ponding water level can affect the leaching and surface runoff water from paddy fields, which in turn affects nitrogen loss from paddy fields. In conclusion, field drainage in the early rice growing stages (recovering, tillering, and jointing-booting stages), especially within one week after fertilization, should be avoided. The paddy field drainage level should be raised to increase the field water capacity, thereby reducing nitrogen loss.

Keywords: paddy field; non-point source pollution; nitrogen loss; hydrologic characteristics

水稻是全球最主要的粮食作物,全世界50%以上的人口以水稻为主食^[1]。我国是世界上主要的水稻生产国,其水稻种植面积和产量分别占全球种植面积和产量的19%和32%^[2]。因此,我国水稻的可持续生产对确保全球粮食安全具有重要意义。为保证水稻产量,过量化肥和水分被投入到水稻生产中,导致稻田水肥利用率低、氮素流失严重,从而引发了稻作区水体富营养化等一系列环境问题。因此,如何在保证作物产量的同时,提高水肥利用率并减少稻田面源污染,已成为我国流域水环境管理领域的研究热点之一。

稻田氮素随水分流失主要为通过地表径流到达受纳水体的地表径流流失和通过土壤水分运动渗漏到地下水的渗漏流失两种途径^[3-4]。降雨、灌溉、田面水和土壤含水量等稻田水文因素,为氮素运输和迁移提供了动力和载体,对稻田氮素流失产生重要影响^[5]。这些水文因素通过影响田面水位,进而影响稻田水容量和氮素迁移转化^[6]。已有研究多集中于降雨和灌溉对稻田氮素流失的影响,例如:Qi等^[7]在湖北荆州的研究表明,降低灌溉频率和减少灌溉水量可以减少稻田氮素流失;Zhao等^[8]在长江中游地区的研究表明,降雨量、强度和频率对渗漏水中氮素浓度具有重要影响。针对降雨、灌溉、田面水位和土壤含水量等多因子水分动态变化与氮素流失的相关关系仍需继续开展系统研究。

长江流域稻作区是我国三大水稻主产区之一,其水稻播种面积和产量分别占全国总量的64%和66%^[9]。目前学界关于长江流域单季稻田氮素随水分流失主要途径的研究结果不一。Zhou等^[10]在太湖地区的研究表明,地表径流流失是稻田氮素流失的主要途径;而Fu等^[11]和Shi等^[12]在江汉平原的研究表明,渗漏流失是稻田氮素流失的主要形式。因此,有必要继续在田间尺度开展稻田氮素流失动态变化规律的系统研究,识别稻田氮素流失的主要途径和关键期,以便有效防控稻田氮素流失。由于取样条件和取样成本的限制,已有研究对田面水位动态变化的高频率监测较少,而且田面水和土壤水的采样频率有限,田面水质的监测多集中于施肥后一周,土壤水质的监

测多集中于水稻移栽后,取样间隔较长(每周一次或每两周一次)^[11,13]。因此,本研究通过对长江流域典型单季稻田开展高频率的多因子水分动态与氮素流失动态监测,分析田面水及土壤水中氮素浓度动态变化特征,揭示稻田氮素流失的主要途径和关键生育期,以期当地农业发展和水环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于湖北省安陆市车站村(113°39'E, 31°19'N),该地属于亚热带季风气候,光能充足,热量丰富,年平均无霜期为261 d,多年平均降雨量为1 068 mm,多年平均气温为16.66℃。土壤类型为水稻土,土壤质地为黏土(黏土含量为29.7%),土壤容重为1.22 g·cm⁻³,土壤有机质含量为23.60 g·kg⁻¹,总氮含量为1.15 g·kg⁻¹,土壤pH为6.60。田间试验点照片见图1。

1.2 试验设计

试验期为2017年和2018年水稻生长季,水稻种植模式为单季中稻,具体生育期划分见表1。5月上旬育秧苗,5月下旬上水泡田整地,施用基肥后移栽插秧,在分蘖期和拔节孕穗期追施氮肥,9月下旬收获。每公顷均匀撒施氮肥72 kg(以N计)、磷肥75 kg(以P₂O₅计)、钾肥60 kg(以K₂O计)作为基肥;每次追肥每公顷均匀撒施氮肥54 kg(以N计)。试验所用的氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(46% N)、过磷酸钙(12% P₂O₅)和氯化钾(60% KCl)。2017年5月24日施用基肥,5月31日追施分蘖肥,7月10日追施穗肥。2018年5月30日施用基肥,6月6日追施分蘖肥,7月21日追施穗肥。水稻中期(2017年7月1—9日、2018年7月9—20日)和收获前一周(2017年9月19—25日、2018年9月21—27日)晒田。

1.3 样品采集与分析

气象数据由安装在试验区内的ZENO气象站(Coastal, Seattle, WA, 美国)提供,土壤含水量的动态变化由安装在不同土层深度(15、30、60 cm和90 cm)的土壤湿度传感器(TDR type, Coastal, Seattle, WA, 美国)实时监测,监测频率为每30 min一次。水稻生长



图1 田间试验点

Figure 1 The field experimental site

表1 水稻生育期划分

Table 1 Detailed information of rice growing stages

年份 Year	泡田期 Pre-flooding stage	返青期 Recovering stage	分蘖期 Tillering stage		拔节孕穗期 Jointing- booting stage	抽穗扬花期 Blooming stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Ripening stage	
			前期	后期				前期	后期
			Early stage	Later stage				Early stage	Later stage
2017	05-20—05-24	05-25—05-31	06-01—06-30	07-01—07-09	07-10—08-10	08-11—08-20	08-21—09-01	09-02—09-18	09-19—09-25
2018	05-26—05-30	05-31—06-06	06-07—07-08	07-09—07-20	07-21—08-12	08-13—08-19	08-20—08-31	09-01—09-20	09-21—09-27

期间,于早上8:00—10:00用直尺人工测量田面水位高度,同时在不扰动水层的情况下,用自制取样器按照对角线取样法,采集5个田面水混合水样。4个土壤水采样器(MacroRhizon, Rhizosphere, 荷兰,长90 cm,直径4.5 cm,孔径0.2 μm)分别与地面呈不同角度置入土壤,对稻田15、30、60 cm和90 cm深处的土壤水样进行采集,土壤水采样器置入时先用土钻取土壤,在土钻孔洞中放置采样器,并将原位取出的土壤回填到土钻孔洞中,土壤溶液会缓慢从管路流进注射器,实现土壤水样的采集。田面水及土壤水在每次施肥后5 d内每日连续取样,之后每2 d取样一次,直至水质无明显波动。每次灌溉、降雨和人为排水时,记录相应的水量并取水样。所有水样均储存在聚乙烯瓶中,带回实验室立即冷冻,并尽快测定。

水样中总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)浓度用流动分析仪(AACE,德国)测定。在水样中加入碱性过硫酸钾消解后测定TN浓度,水样经0.45 μm微孔滤膜过滤后测定NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度。有机态氮(ON-N)浓度为TN与NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度的差值。

1.4 数据分析

1.4.1 稻田水量平衡计算

稻田各水分因子间的动态平衡见公式(1)。其中,水分输入包括灌溉和降雨,水分输出包括蒸散发、

地表径流和地下渗漏,储存在稻田的水分包括土壤储水量和田面水量^[11]。

$$P+I=ET_c+R+L+(\Delta S+\Delta H) \quad (1)$$

式中: P 为降雨量,mm; I 为灌溉量,mm; ET_c 为蒸散发量,mm; R 为地表径流量,包括降雨径流及人为排水,mm; L 为地下渗漏量,mm; ΔS 为土壤储水量变化,mm; ΔH 为田面水位高度差,mm。

田面水位变化量由时间段内田面水位高度前后的差值计算得出,土壤储水量变化由时间段内土壤储水量前后的差值计算得出。稻田蒸散发量采用FAO-56推荐的单作物系数计算获得^[14],具体算法见公式(2)和公式(3)。根据稻田水量平衡公式(1)可计算得到稻田渗漏量。

$$ET_c=K_c \times ET_0 \quad (2)$$

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma [900 / (T + 273)] u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

式中: K_c 为作物系数,根据当地农科院调研获得; ET_0 为水稻的参考需水量,mm; R_n 为净辐射,MJ·m⁻²·d⁻¹; G 为土壤热通量,MJ·m⁻²·d⁻¹; T 为平均空气气温,℃; u_2 为2 m高处的风速,m·s⁻¹; e_s 和 e_a 分别为饱和水气压和实际水气压,kPa; Δ 为饱和水气压-温度曲线上的斜率,kPa·℃⁻¹; γ 为湿度计算常数,kPa·℃⁻¹。

利用土壤湿度传感器监测的土壤含水量计算土壤储水量^[15]。假定在15、30、60 cm和90 cm土层深度测定的土壤含水量代表的是0~15、15~30、30~60 cm和60~90 cm 4个土层的土壤含水量。基于每一层的土壤含水量为上层土壤含水量和下层土壤含水量的平均值这一假设,0~30 cm土体的平均土壤含水量和0~90 cm土体的平均土壤含水量可由公式(4)和公式(5)计算得到,0~90 cm土体的平均储水量可由公式(6)计算得到。

$$\theta_{0-30} = \frac{1}{3} (2.25\theta_{15} + 0.75\theta_{30}) \quad (4)$$

$$\theta_{0-90} = \frac{1}{9} (2.25\theta_{15} + 2.25\theta_{30} + 3\theta_{60} + 1.5\theta_{90}) \quad (5)$$

$$S = (2\theta_{15} + 2\theta_{30} + 4\theta_{60} + \theta_{90}) \times 100 \quad (6)$$

式中: θ_{15} 、 θ_{30} 、 θ_{60} 和 θ_{90} 分别为15、30、60 cm和90 cm土层深度测定的土壤含水量,%; θ_{0-30} 、 θ_{0-90} 分别为0~30 cm和0~90 cm土体的平均土壤含水量,%; S 为0~90 cm土体的平均储水量,mm。

1.4.2 稻田氮素流失量计算

利用水样中氮素浓度乘以流失水量来计算氮素地表径流流失量或渗漏流失量。该区地下水位约为1 m,因此采用90 cm土壤水中的氮素浓度计算渗漏流失量。稻田氮素流失总量是地表径流和渗漏流失量的总和。氮素地表径流流失或渗漏流失的计算公式如下:

$$Q = \sum Q_i = \sum C_i \times V_i / 100 \quad (5)$$

式中: Q 为氮素地表径流或渗漏流失总量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; i 为地表径流或渗漏事件数, $i=1,2,3,\dots,n$; Q_i 为第*i*次氮素地表径流或渗漏流失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_i 为水样中氮素浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_i 为地表径流或渗漏水量,mm。

2 结果与分析

2.1 稻田水文特征

2.1.1 田面水位变化特征

为了解田面水位变化特征以及影响因素,对水稻生长期降雨量、灌溉量、田面水位高度变化情况进行分析(图2)。试验第一年生长季总降雨量(510 mm)高于第二年(246 mm),分别代表平水年和枯水年(试验点水稻生长季多年降雨量为246~911 mm,平均值为585 mm)。当发生灌溉或降雨时,田面水位高度迅速增加,例如在平水年,移栽后第46天降雨91.44 mm时,田面水位由0提高到75.80 mm。平水年移栽38~46 d和118 d后,枯水年41~52 d和114 d后,田面水位高度为0,这是因为分蘖后期和收获前排水晒田。抽穗扬花期的田面水位平均值为68 mm,该时期水稻生长需水较多。灌溉是稻田的主要水分输入,灌溉水量占稻田水分输入的60%以上。

2.1.2 土壤水变化特征

稻田土壤水时空分布(图3)表明,移栽后40 d左右,表层15 cm和30 cm土层的土壤含水量均表现为下降趋势(平水年由40.06%下降到37.96%,枯水年由39.12%下降到36.48%),而深层90 cm土层的土壤含水量表现为增加趋势(平水年由45.23%上升到49.36%,枯水年由44.90%上升到50.90%)。这可能是由于排水后田面呈现无水状态,稻田蒸散发使表层0~15 cm的土壤含水量迅速下降,同时水稻根系吸水使30 cm土层的土壤含水量显著降低,90 cm土层的土壤含水量增加可能是由地下水补给引起的。

土壤储水量整体处于较高水平,这与生长季稻田

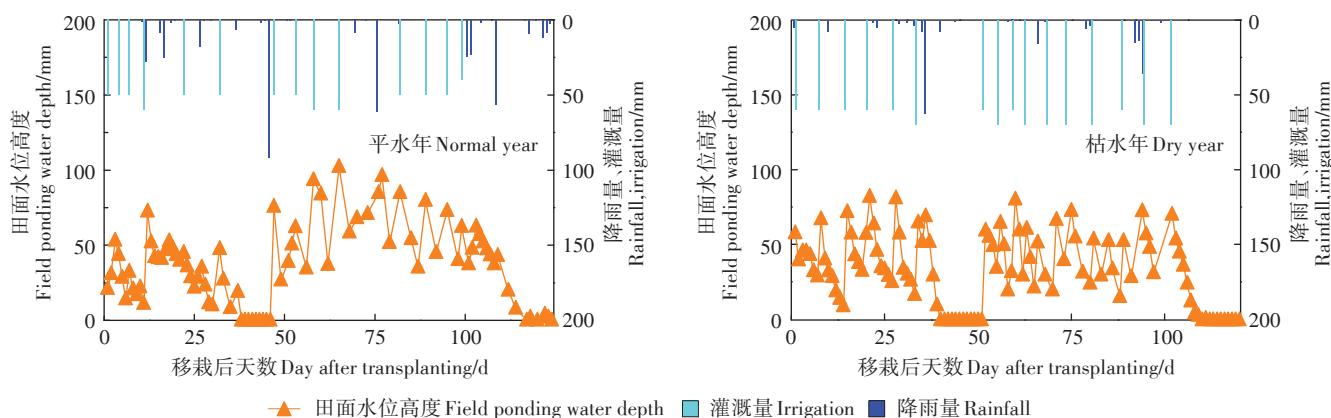


图2 水稻移栽后降雨量、灌溉量和田面水位高度动态变化

Figure 2 Dynamics of rainfall, irrigation and field ponding water depth after rice transplanting

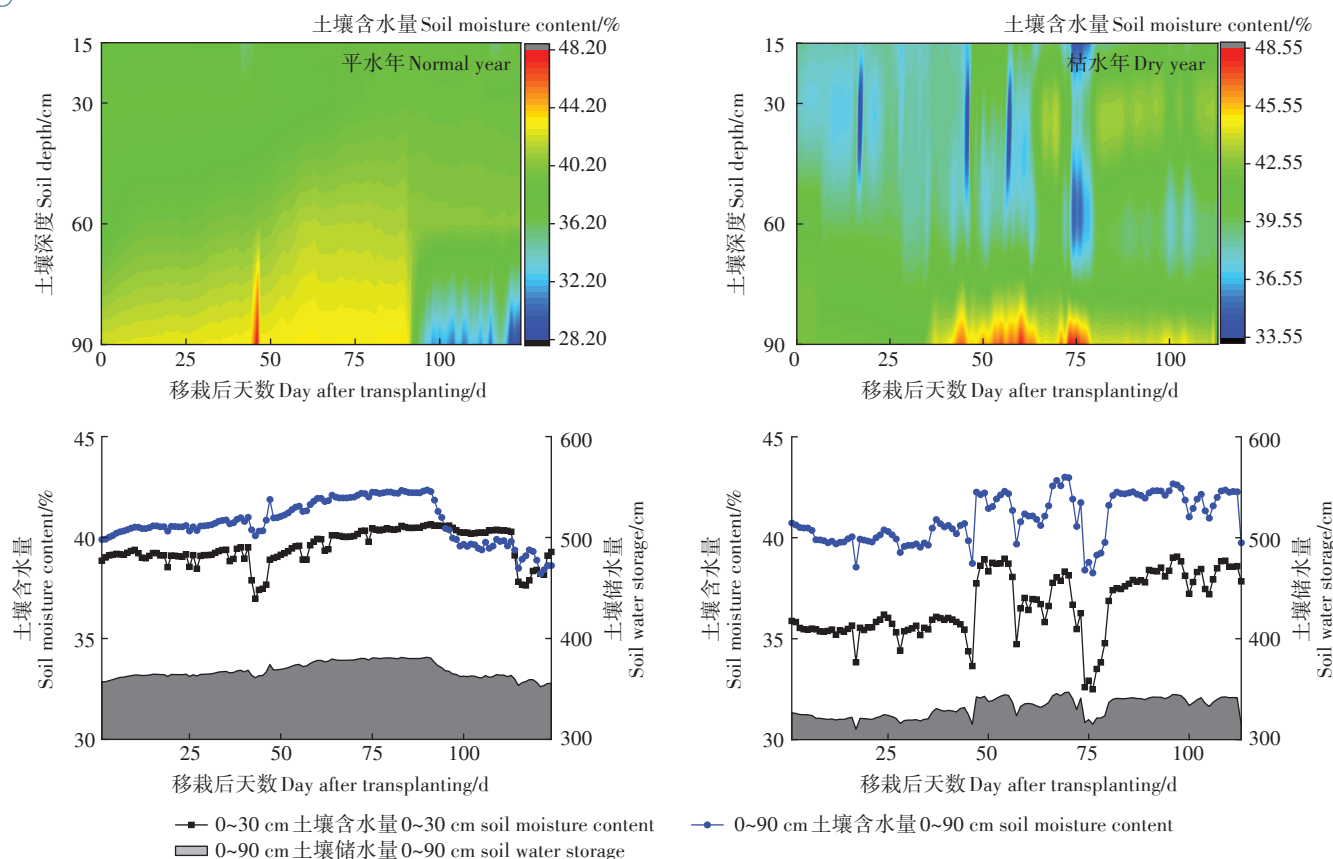


图3 水稻移栽后土壤含水量和0~90 cm土壤储水量的动态变化

Figure 3 Dynamics of soil water content and 0~90 cm soil water storage after rice transplanting

几乎处于常淹状态有关。平水年的平均土壤储水量(368 mm)高于枯水年(331 mm);水稻移栽后,土壤储水量逐渐增大,并在移栽后第90天和第70天时达到最大值(平水年为381 mm,枯水年为347 mm);在移栽后第40天左右,土壤储水量稍有下降,这是因为分蘖后期晒田时,稻田处于无水状态;黄熟期收获排水,移栽最后几天土壤储水量降到最低值(平水年为352 mm,枯水年为310 mm)。综上,稻田土壤水含量及土壤储水量动态变化主要受不同生育期稻田水分管理及降雨条件的影响。

2.2 稻田氮素浓度特征

2.2.1 田面水中氮素浓度变化特征

水稻生长期,3次施肥后出现3次氮素浓度高峰,平水年移栽后第1、9、50天,TN浓度分别为39.51、35.70、27.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,枯水年移栽后第1、9、56天,TN浓度分别为51.71、53.99、31.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图4)。施肥后第7天,田面水中氮素浓度比第1天降低80.88%,说明氮肥施用是影响田面水中氮素浓度的主要因素。在施肥后一周内,氮素主要以 NH_4^+-N 形式存在,其占TN浓度的66.88%。随着时间的推移, $\text{ON}-\text{N}$ 成为氮

素的主要形态。这是因为氮肥进入水体后首先转化为 NH_4^+-N ,在植物吸收、土壤吸附、氨挥发、硝化和反硝化作用下TN和 NH_4^+-N 浓度迅速降低。

2.2.2 土壤水中氮素浓度变化特征

与田面水氮素浓度相比,土壤水中氮素浓度较低,TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度平均为1.41、0.19、0.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图5)。移栽后第1天,15 cm土壤水中TN和 NH_4^+-N 浓度迅速上升到最大值,分别为3.53、1.75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。移栽后第4天,60 cm处土壤水中 NO_3^--N 上升到最大值,为1.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。整个生育期, NO_3^--N 浓度处于较低水平,但移栽后第53天,15 cm和30 cm土壤水 NO_3^--N 浓度有所提高。这可能是因为生育后期田面水位下降,稻田处于有氧状态,土壤硝化作用增强使 NO_3^--N 浓度上升。表层15 cm和深层90 cm处氮素浓度高于中间土层,且在30 cm有一个明显的分界层,这可能是由于根系吸水作用使得该土层氮浓度降低。

2.3 稻田氮素流失特征

为识别稻田氮素流失的主要途径和关键生育期,对不同生育期氮素渗漏流失量和地表径流流失量进行分析(表2)。在整个生育期,平水年和枯水年的地

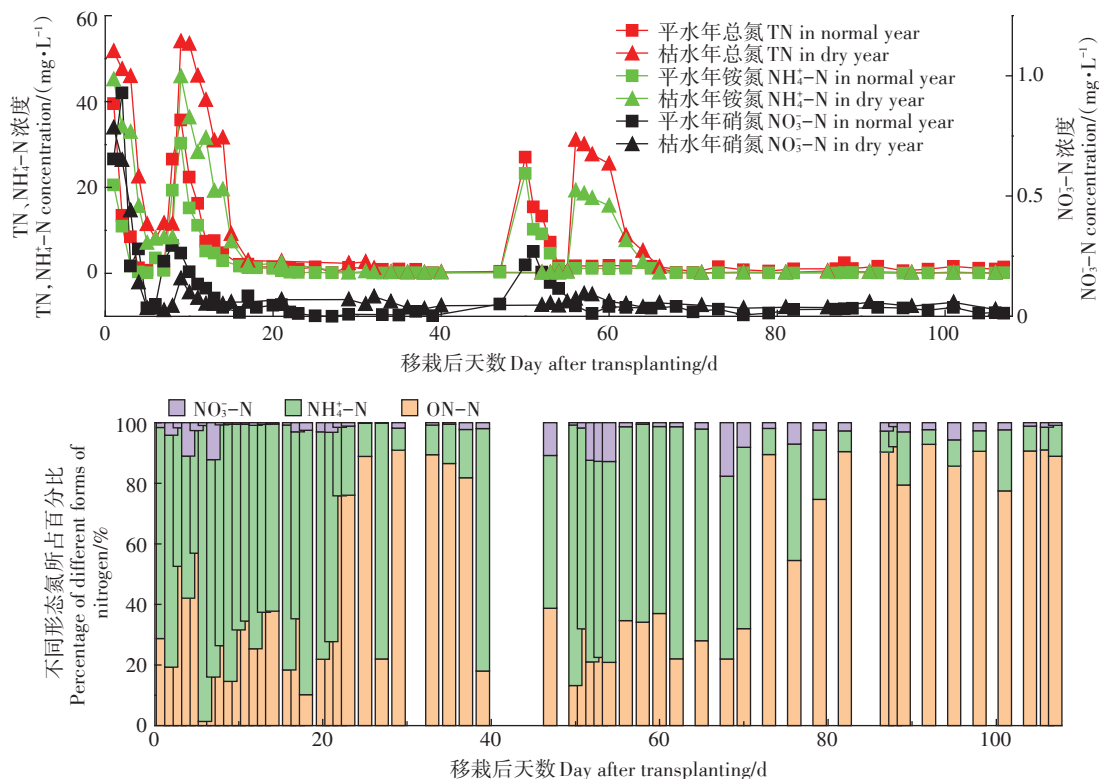


图4 水稻移栽后面水中不同形态氮含量的动态变化

Figure 4 Dynamics of different nitrogen forms in the field ponding water after rice transplanting

表径流量分别为 143.57、78.90 mm, 渗漏水量分别为 525.03、633.00 mm; 平水年和枯水年的氮素地表径流流失量分别为 8.70、1.26 kg·hm⁻², 渗漏流失量分别为 3.94、4.86 kg·hm⁻²。这说明平水年稻田氮流失的主要途径为地表径流流失, 枯水年稻田氮流失的主要途径为渗漏流失。

氮素渗漏流失主要发生在返青期, 平水年和枯水年该时期渗漏流失量分别为 1.73、2.14 kg·hm⁻², 占渗漏流失总量的 43.85%、44.00%。氮素地表径流流失主要发生在分蘖期和拔节孕穗期, 平水年和枯水年这两个时期地表径流流失量分别为 7.10、1.26 kg·hm⁻², 占地表径流流失总量的 81.61%、100.00%。不同形态氮素流失的关键生育期一致。因此, 针对氮素渗漏流失要重点关注返青期, 针对氮素地表径流流失要重点关注分蘖期和拔节孕穗期。

2.4 水文因子对稻田氮素流失的影响

为探究水文因子与氮素渗漏流失的关系, 在日尺度上, 分别对渗漏量 and 水分输入、田面水位高度差以及氮素渗漏流失量进行相关分析(图6)。渗漏量与水分输入呈极显著正相关关系($R^2=0.35, P<0.01$), 与田面水位高度差呈极显著负相关关系($R^2=0.38, P<$

0.01), 说明降雨量和灌溉量增加会促进稻田渗漏流失。这是因为田面水位高度差主要受灌溉和降雨的影响, 田面水位的变化又影响着稻田渗漏量。氮素渗漏流失量与渗漏量呈极显著正相关关系($R^2=0.48, P<0.01$)。

为明确降雨量和稻田水容量(排水水位与降雨前田面水位的差值)对地表径流量的影响, 以及降雨量和施肥后天数对不同形态氮素浓度的影响, 利用监测数据和文献收集的数据^[16-21]进行分析(图7)。在相同降雨条件下, 稻田水容量越大, 径流量越小。低于 25 mm 的降雨, 径流发生概率较低, 超过 50 mm 的降雨, 径流发生概率较高。施肥期(施肥后一周)和非施肥期地表径流中总氮浓度分别为 $(7.78\pm6.35)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(2.75\pm2.99)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随降雨量的增加, 地表径流水中氮浓度升高。

3 讨论

3.1 稻田氮素流失关键途径及关键生育期

识别稻田氮素随水分流失的关键途径及关键期可以更好地对农业面源污染进行防控。本研究表明, 在平水年稻田氮素以径流流失为主, 在枯水年以

表2 不同生育期氮素渗漏流失量和地表径流流失量
Table 2 Nitrogen leaching loss and runoff loss at different rice growing stages

生育期 Growing stage	渗漏流失 Leaching loss				地表径流流失 Runoff loss			
	水量 Water volume/mm	TN/ (kg·hm ⁻²)	NH ₄ ⁺ -N/ (kg·hm ⁻²)	NO ₃ ⁻ -N/ (kg·hm ⁻²)	水量 Water volume/mm	TN/ (kg·hm ⁻²)	NH ₄ ⁺ -N/ (kg·hm ⁻²)	NO ₃ ⁻ -N/ (kg·hm ⁻²)
平水年	返青	79.14	1.73	0.52	0.05	0	0	0
	分蘖	105.12	1.24	0.46	0.01	107.05	5.40	2.81
	拔节孕穗	182.26	0.67	0.24	0.02	14.70	1.70	0.44
	抽穗扬花	22.16	0.04	0.002	0.003	0	0	0
	灌浆	88.23	0.27	0.05	0.03	21.82	1.60	0.49
	成熟	48.13	0.03	0.002	0.01	0	0	0
	流失总量	525.03	3.94	1.26	0.11	143.57	8.70	3.88
枯水年	返青	79.59	2.14	0.95	0.17	0	0	0
	分蘖	128.53	0.59	0.43	0.20	78.90	1.26	0.50
	拔节孕穗	215.20	1.215	0.85	0.16	0	0	0
	抽穗扬花	66.68	0.49	0.24	0.09	0	0	0
	灌浆	101.70	0.11	0.12	0.01	0	0	0
	成熟	41.31	0.33	0.25	0.03	0	0	0
	流失总量	633.00	4.86	2.83	0.64	78.90	1.26	0.51

渗漏流失为主,这是因为稻田在田埂的保护下形成相对封闭的体系,只有发生强降雨,稻田蓄水量超过稻田水容量时,田面水才会溢出田埂发生地表径流^[22]。而稻田渗漏是长期存在的现象,田面水的存在使田间水分不断向地下垂直迁移。实际上,水稻生长季常与降雨同季,因此平水年或丰水年地表径流流失量较大^[11,23]。同时,氮素随径流横向迁移的能力比随土壤水纵向迁移的能力强,导致地表径流水中氮素浓度远高于渗漏水。分蘖期和拔节孕穗期的降雨量占生育期总降雨量的60%以上,因此分蘖期和拔节孕穗期为稻田氮素径流流失的关键生育期。肥料施入稻田后,田面水中氮素浓度迅速增加,随着时间的推移浓度逐渐降低,并在施肥后一周趋于稳定,如果在施肥后一周内发生强降雨,则径流水中氮素浓度较高,这与前人研究结果一致^[8,21]。乔月等^[24]在湖北的研究表明,播种前排水导致的氮素径流流失约占总氮径流流失的52%。因此,应避免播种前和水稻生育前期(返青期、分蘖期和拔节孕穗期),特别是施肥后一周内田面水的外排^[25-27]。

3.2 稻田水文对氮素流失的影响

稻田氮素流失量与稻田水文密切相关。本研究发现渗漏水量与水分输入呈极显著正相关,与田面水位高度差呈极显著负相关,与氮素渗漏流失呈显著正相关,这与前人研究结果一致^[28-30]。因此,减少渗漏水量可显著降低氮素渗漏流失^[31],可以通过降低水分

输入以及控制灌溉降低田面水位高度来减少稻田氮素渗漏流失^[32]。稻田水容量是决定稻田容纳降雨量的重要指标,是影响稻田径流量和氮素流失的重要因素^[8]。本研究表明,施肥期(施肥后一周)随降雨量的增加,地表径流水中氮浓度升高,这与Zhang等^[33]对长江流域的研究结果一致。在相同降雨条件下,稻田水容量越大,径流量越小,这与前人研究结果一致^[27]。因此,提高稻田水容量是有效减少稻田径流流失的重要途径。所以提高稻田排水水位是提高稻田水容量、减少氮素流失的重要途径^[34]。

稻田氮素渗漏损失作为氮素损失的重要组成部分,对农业面源污染的影响不容忽视。本研究中水稻生育期内氮素渗漏流失量为3.94~4.86 kg·hm⁻²,稻季氮素渗漏流失量占当季施肥量的2.19%~2.70%,这与朱兆良^[35]与黄明蔚等^[36]的研究认为化肥氮素渗漏流失量约占化肥氮施用量2%左右的结果一致。但本研究中氮素渗漏流失量低于李娟^[21]在浙江地区的渗漏流失量(18.86~40.39 kg·hm⁻²)。除气候条件和施肥量不同以外,可能还与试验条件及土壤质地不同等有关,本研究中土壤质地为黏土,黏土与砂壤土相比更不易发生渗漏。虽然本研究开展了为期两年的高频率监测,为了解稻田水文和氮素流失特征提供了较为可靠的数据支持,但为了更加准确地掌握稻田水文与氮素流失之间的关系,仍有必要继续开展多年监测。

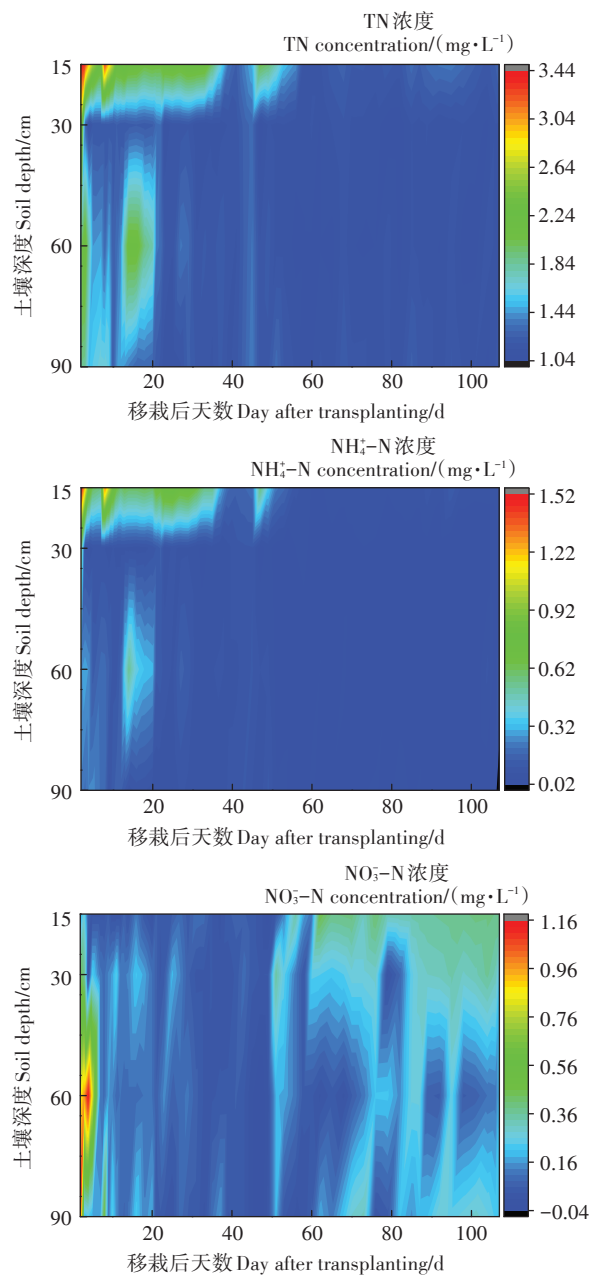


图5 水稻移栽后土壤水中不同形态氮素浓度的时空分布(平水年)

Figure 5 Temporal and spatial variations of different nitrogen forms in the soil water after rice transplanting(Normal year)

4 结论

(1)降雨和灌溉是田面水位变化的主要影响因素,其中灌溉是稻田主要的水分输入。不同深度土壤含水量主要受田间水分管理的影响,施肥是田面水和土壤水中氮素浓度变化的重要影响因素。

(2)地表径流流失是平水年稻田氮素流失的主要途径,渗漏流失是枯水年稻田氮素流失的主要途径。稻田氮素渗漏流失主要发生在返青期,氮素地表径流

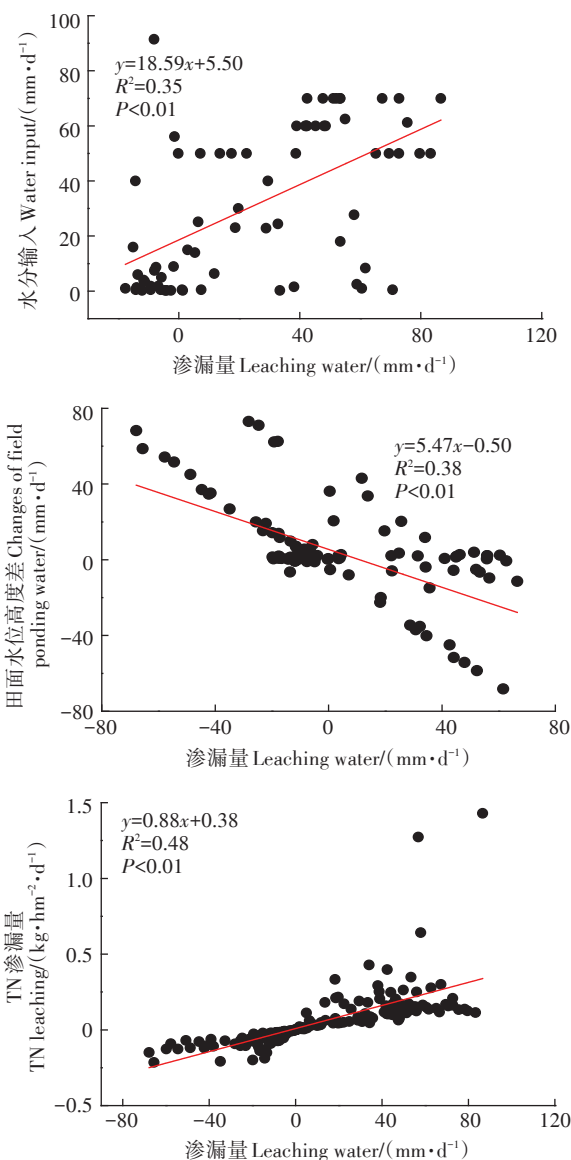


图6 渗漏量与水分输入、田面水位高度差以及氮素渗漏流失量的相关分析

Figure 6 Correlation analysis between leaching water and water input, changes of field ponding water depth, and leaching losses of nitrogen

流失主要发生在分蘖期和拔节孕穗期。应避免水稻生育期前期,特别是施肥后一周内的田面水外排。

(3)稻田渗漏流失与田面水位高度差呈负相关,与田间水分输入呈正相关。稻田径流流失取决于稻田水容量和降雨量。在实际生产中,可以提高稻田排水水位,扩大稻田水容量,从而减少稻田氮素流失。

参考文献:

- [1] LAMPAYAN R M, REJESUS R M, SINGLETON G R, et al. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for ir-

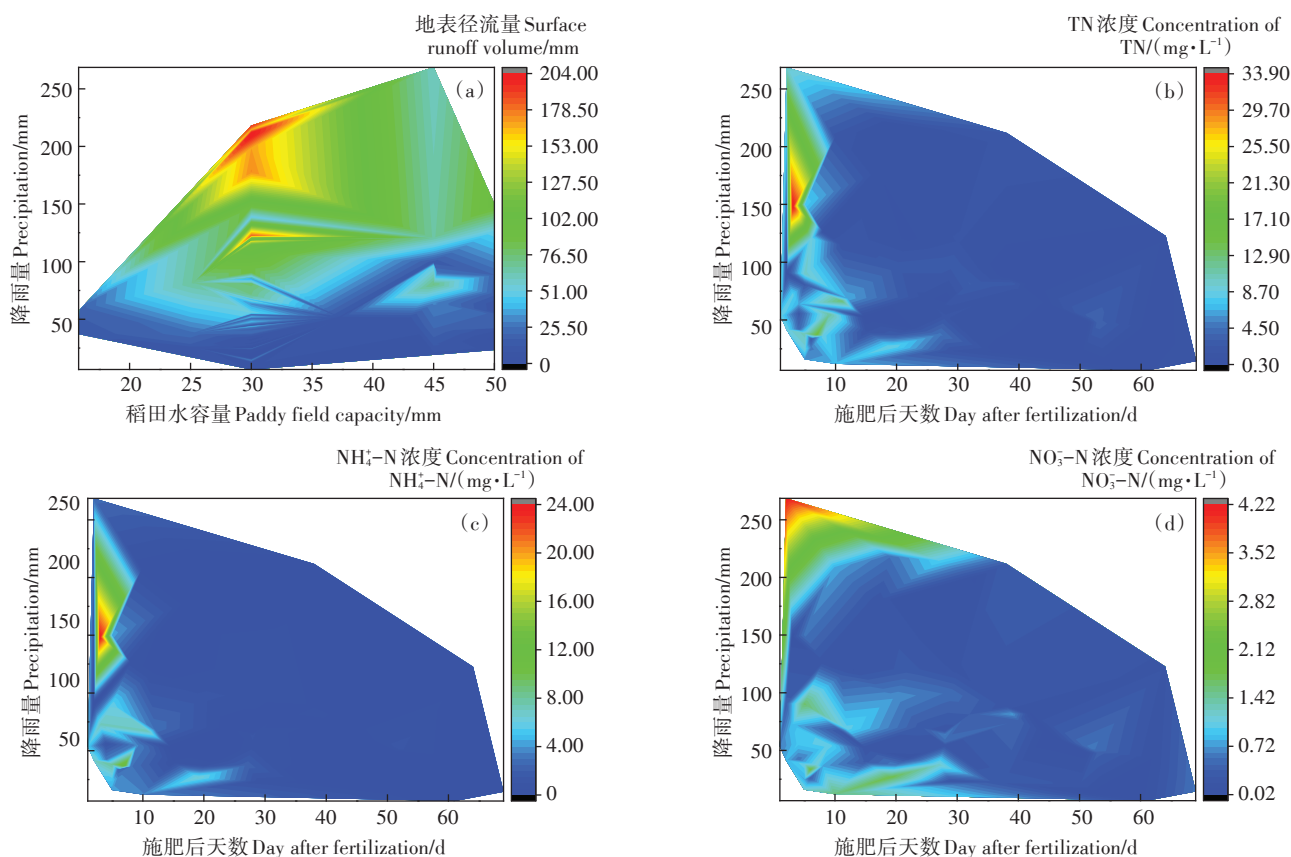


图7 地表径流量和地表径流水中氮浓度随降雨量、稻田水容量及施肥后天数的动态变化

Figure 7 Dynamic changes of runoff volume, nitrogen concentrations in runoff with rainfall amount, paddy field capacity and days after fertilization

- rigated lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 2015, 170:95–108.
- [2] The Food and Agriculture Organization. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database[DB/OL]. [2022-02-14]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data>.
- [3] JUNG J, YOON K, CHOI D, et al. Water management practices and SCS curve numbers of paddy fields equipped with surface drainage pipes[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110:78–83.
- [4] OUYANG W, CHEN S, WANG X, et al. Paddy rice ecohydrology pattern and influence on nitrogen dynamics in middle-to-high latitude area[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529(3):1901–1908.
- [5] 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.
- [6] HITOMI T, IWAMOTO Y, MIURA A, et al. Water-saving irrigation of paddy field to reduce nutrient runoff[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(6):885–891.
- [7] QI D L, WU Q X, ZHU J Q. Nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and the yield of rice with different water and nitrogen management practices[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):9734.
- [8] ZHAO X, ZHOU Y, WANG S, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3):1068.
- [9] 中华人民共和国农业部. 全国优势农产品区域布局规划(2008—2015年)[EB/OL]. (2009-02-18)[2022-02-14]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/200902/t20090218_1220849.htm. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Regional layout planning of national dominant agricultural products during 2008—2015 [EB/OL]. (2009-02-18)[2022-02-14]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/200902/t20090218_1220849.htm.
- [10] ZHOU W, GUO Z, CHEN J, et al. Direct seeding for rice production increased soil erosion and phosphorus runoff losses in subtropical China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695:133845.
- [11] FU J, WU Y, WANG Q, et al. Importance of subsurface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213:627–635.
- [12] SHI X, 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, 228:105877.
- [13] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 156:1–11.
- [14] ALLEN R G. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of

- the United Nations, 1998:300.
- [15] MOROIZUMI T, HAMADA H, SUKCHAN S, et al. Soil water content and water balance in rainfed fields in northeast Thailand[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1):160-166.
- [16] 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, LI 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]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4):551-557.
- [17] 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. LIANG X Q, TIAN G M, LI H, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63.
- [18] 曾招兵, 艾绍英, 姚建武, 等. 珠三角地区施肥对早稻氮素径流流失的影响[J]. 广东农业科学, 2010, 37(9):27-30. ZENG Z B, AI S Y, YAO J W, et al. Effect of fertilization on nitrogen runoff from early paddy field in the Pearl River Delta region[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(9):27-30.
- [19] 孙国峰, 张丽萍, 周炜, 等. 连续施用猪粪有机肥的高产稻田氮磷钾径流流失特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23):349-351. SUN G F, ZHANG L P, ZHOU W, et al. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium runoff loss in high-yielding paddy fields with continuous application of pig manure organic[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(23):349-351.
- [20] 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. WANG J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1164-1171.
- [21] 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, 2016:100. LI J. Effects of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorus losses from paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016:100.
- [22] 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, et al. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment I. Characteristics of soil losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5):97-102.
- [23] TAKEDA I, FUKUSHIMA A. Long-term changes in pollutant load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system[J]. *Water Research*, 2006, 40(3):569-578.
- [24] 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.
- [25] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10):3292-3302. ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10):3292-3302.
- [26] HUA L, LIU J, ZHAI L, et al. Risks of phosphorus runoff losses from five Chinese paddy soils under conventional management practices[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 245:112-123.
- [27] WU Y L, FU J, KANG X Q, et al. Characteristics and drivers of daily nitrogen and phosphorus losses from rice-rapeseed rotation systems in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(35):48785-48798.
- [28] HUANG N, SU B, LI R, et al. A field-scale observation method for non-point source pollution of paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146:305-313.
- [29] 卢成, 郑世宗, 胡荣祥. 不同水肥模式下稻田氮渗漏和挥发损失的¹⁵N同位素示踪研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3):107-109. LU C, ZHENG S Z, HU R X. Percolation and volatilization loss of fertilizer-N in paddy field by isotope ¹⁵N tracer in different irrigation and fertilization modes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(3):107-109.
- [30] HUA L, ZHAI L, LIU J, et al. Characteristics of nitrogen losses from a paddy irrigation-drainage unit system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2019, 285(1/2/3/4):106629.
- [31] LU B, SHAO G C, YU S E, et al. The effects of controlled drainage on N concentration and loss in paddy field[J]. *Journal of Chemistry*, 2016, 2016:1073691.
- [32] 俞双恩, 李德, 高世凯, 等. 水稻控制灌溉排水模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):128-136. YU S E, LI S, GAO S K, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7):128-136.
- [33] ZHANG Y F, WU H, YAO M, et al. Estimation of nitrogen runoff loss from croplands in the Yangtze River basin: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 272:116001.
- [34] LIU L H, OUYANG W, LIU H B, et al. Drainage optimization of paddy field watershed for diffuse phosphorus pollution control and sustainable agricultural development[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 308:107238.
- [35] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境[C]//《氮素循环与农业和环境》专辑——氮素循环与农业和环境学术讨论会论集. 北京:科学出版社, 2001:7-15. ZHU Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China[C]//Nitrogen Cycle and Agriculture and the Environment Album: Proceedings of the Nitrogen Cycle and Agriculture and the Environment Colloquium. Beijing: Science Press, 2001:7-15.
- [36] 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.

(责任编辑:朱晓昱)