

斜发沸石对辽西半干旱区节水灌溉稻田的节水减肥效应

吴奇 陈弘扬 王延智 迟道才

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 针对辽西半干旱区稻田土壤保水保肥能力低下的问题,并为探明节水灌溉稻田中斜发沸石的节水减肥效应、明确其调控的氮积累过程参数与水稻产量之间的关系,于2019年和2020年在辽西彰武县绿维农场进行了大田试验。采用随机区组试验设计,设置常规淹灌(对照)、干湿交替灌溉和施加斜发沸石、干湿交替灌溉和施加斜发沸石并减氮1/4、干湿交替灌溉和施加斜发沸石并减磷1/4、干湿交替灌溉和施加斜发沸石并使用等量有机肥替代传统速效肥等5个处理,对水稻耗水量、干物质质量、吸氮量等指标进行监测。结果表明,相较于常规淹灌,节水灌溉条件下施用斜发沸石可以显著节水4.8%~11.4%、提高水分生产率6.2%~15.5%、减少磷肥用量25%,最高增产9.7%;水稻耗水量呈现先增加、后降低的单峰曲线规律,而水稻需氮规律符合Richards生长函数变化趋势;主成分分析表明,水稻高产的3个关键因素为前期氮素积累量、氮素积累时间和积累过程的平稳性;干湿交替灌溉和施加斜发沸石并减磷1/4处理与干湿交替灌溉和施加斜发沸石处理增产的原因主要是提高了叶片的氮素积累,继而提高了干物质积累量和氮素在穗部的积累量。综上,干湿交替灌溉和施加斜发沸石并减磷1/4处理与干湿交替灌溉和施加斜发沸石处理氮素积累总量和氮素积累时效均较高,且氮素积累较平稳,是辽西半干旱地区稻田节水增效的重要模式。

关键词: 水稻; 半干旱地区; 斜发沸石; 节水减肥; 氮积累时效

中图分类号: S275.3; S278

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)06-0305-09

OSID:



Water-saving and Fertilizer-reducing Effect of Clinoptilolite in Water-saving Irrigated Paddy Fields in Semiarid Areas of Western Liaoning

WU Qi CHEN Hongyang WANG Yanzhi CHI Daocai

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The low water and fertility retention capacity of paddy soils in the semiarid area of Western Liaoning is one of the important obstacles restricting water conservation and high yield in this area. In order to study the water-saving and fertilizer-reducing effects of clinoptilolite in water-saving irrigated paddy fields and clarify the relationship between the process parameters of nitrogen accumulation and rice yields, field experiments were conducted in semiarid areas of Western Liaoning in 2019 and 2020. Conventional flooding irrigation treatment was taken as control, and alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite, alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite and 1/4 less nitrogen treatment, alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite and 1/4 less phosphorus treatment, alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite and local organic fertilizer instead of quick-acting fertilizer treatment, were designed to monitor rice water consumption, dry matter, nitrogen uptake, etc. Results showed that compared with conventional flooding irrigation, clinoptilolite coupled with alternate wet-dry irrigation significantly saved irrigation water by 4.8% to 11.4%, increased water productivity by 6.2% to 15.5%, reduced phosphate fertilizer by 25%, and increased rice grain yield up to 9.7%. The rice water consumption presented that it was firstly increased and then decreased, and the plant nitrogen requirement conformed to the Richards's growth function. The principal component analysis showed that the three important parameters affecting the highrice yield were the nitrogen accumulation

收稿日期: 2021-01-13 修回日期: 2021-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300300)、国家自然科学基金项目(52009078)和辽宁省教育厅科研项目(LSNJC201918)

作者简介: 吴奇(1988—),男,讲师,博士,主要从事农田资源优化与节水灌溉研究,E-mail: qiwu0701@syau.edu.cn

通信作者: 迟道才(1964—),男,教授,主要从事作物绿色高效用水与环境研究,E-mail: chidaocai@syau.edu.cn

amount, nitrogen accumulation duration and stability of nitrogen accumulation process. The significant increase in rice yield for “alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite and 1/4 less phosphorus” treatment, and “alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite” treatment was due to the increased nitrogen accumulation in leaves, and then increased the dry matter accumulation and the nitrogen accumulation in rice panicles. In summary, alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite and 1/4 less phosphorus treatment, and alternate wet-dry irrigation with application of clinoptilolite treatment had characters of both high nitrogen accumulation amount and duration, and stable nitrogen accumulation process, which became the important ways to save irrigation water and increase production efficiency in apaddy field of the semi-arid area of Western Liaoning.

Key words: rice; semiarid area; clinoptilolite; water-saving and fertilizer-reducing; nitrogen accumulation amount and duration

0 引言

我国水稻产量占粮食总产量的40%以上,是最重要的粮食作物之一^[1]。随着我国人口的不断增长,对稻谷的需求也日益增加。按照目前我国稻米年消费量预测,到2030年我国水稻需求量将增加20%以上^[2-3]。水稻是粮食作物中第一用水大户,其用水量占全国总用水量的54%以上,占农业总用水量的70%以上^[4]。而传统淹灌的水稻种植方式存在严重的水资源浪费现象^[5]。辽西半干旱区的水资源量极为匮乏,该区域土壤常年受风沙作用影响,经多年的演变出现了土壤水肥容纳能力差、养分肥效期短等严重问题^[6-9],加之当地长期缺乏对水稻需水、需氮规律的研究和指导,导致水肥管理较为落后。因此,在该地区实施高效节水水稻种植模式非常重要。

近年来,我国已研发出多种高效的水稻节水灌溉技术。浅湿干结合灌溉技术、水稻水能双控灌溉技术、控制灌溉技术的应用为提高农业灌溉用水的利用效率、缓解水资源短缺等发挥了重要作用^[10-11]。在东北稻田中,以水稻能量指标控制的干湿交替灌溉(AWD)技术应用最为广泛。高效的干湿交替灌溉最终目的是将水分与养分较长时间维持在作物根区,进而提高根系对水分和养分的吸收。有研究显示,干湿交替灌溉能减少耗水量27.8%、增加产量10.6%、提高水分生产率30%以上^[12]。但是,以干湿交替形式为主的节水灌溉稻田出现了减产、氨挥发、氮磷径流和入渗损失等一系列问题,说明在关注节水调控的同时,还应关注土壤的保肥蓄水能力,以预防木桶理论中短板效应的产生。

斜发沸石(Clinoptilolite, Cp)是一种框架状结构的水合铝硅酸盐矿物质,其结构基础是硅(铝)氧四面体,在三维空间内有丰富的环和笼状结构。特殊的结构使其持水量可达自身重量的50%左右^[13],是一种良好的土壤保水材料。当土壤水分降低到一

定水平时,这部分水分就会释放出来补充作物根区的水分,从而提高土壤持水量^[14]。同时,Cp也可以作为一种控肥材料。迟道才等^[15]研究发现,稻田施用Cp能够促进植株对氮素的吸收,降低氮素损失。WU等^[16-17]研究表明,Cp对土壤氮的调控释放表现为先触发氮胁迫、随后缓慢释放20 d,这种控释特征能够降低施氮频率,有利于增加水稻的氮积累时效、减少肥料的施用总量。陈涛涛等^[18]研究发现,Cp与节水灌溉存在协同效应,即在节水灌溉条件下,Cp的节水增产效应更加明显。因此,在节水灌溉下施用Cp,能够充分发挥其吸附-解吸作用,弥补节水灌溉的短板,达到节水增产的目的。现有大多数研究只关注沸石的节水增产作用,而在节水灌溉下,Cp对半干旱区水稻节水、减肥、增产多重效应的相关研究较少。此外,氮素积累过程与水稻产量关联性最强,而以往研究并未将水稻氮积累过程参数与水稻高产对应起来,也未完全揭示灌溉方式和沸石如何通过调控氮积累过程而影响水稻产量。

本文通过分析Cp对干湿交替稻田水稻生长、耗水、需氮规律、氮素积累及其过程参数等指标的影响,重点阐明节水灌溉稻田中Cp的节水减肥双重效应,研究并揭示基于斜发沸石调控的氮积累过程参数与水稻产量之间的关系,为辽西半干旱区节水灌溉稻田节水减肥、稳产增产和构建水肥管理合理评价模式提供思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验于2019—2020年在辽宁省彰武县绿维农场开展。研究区位于辽西半干旱区(42°64'N, 122°36'E),如图1所示。研究区全年四季变化明显,雨热同期,其多年平均降雨量为350~500 mm,多集中在6—8月,多年平均蒸发量为1700 mm,作物生育期蒸发量为1300 mm,占年蒸发量的76.4%。此区域水资源较为匮乏,大于500 mm的

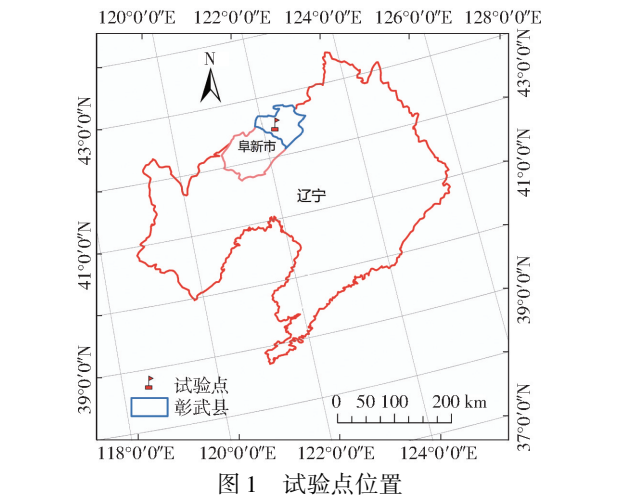


图1 试验点位置

降水保证率仅为21.5%^[9],多年平均气温7.6℃,无霜期152 d。土壤质地为砂壤土,pH值为7.2,总氮质量比1.28 g/kg,碱解氮质量比92.15 mg/kg,有效磷质量比18.76 mg/kg,有效钾质量比201.43 mg/kg,有机质质量比13.05 g/kg。由于其土壤常年受风沙作用影响,且持续干旱少雨,肥水容纳能力较差。

1.2 试验材料

供试稻种采用“辽梗399”,生育期154 d左右,属中熟品种。行距为30 cm,株距为13.3 cm,每穴插3~4株。供试肥料为尿素、有机肥、五氧化二磷和氧化钾。耕地前先用100~150 kg有机肥培田。深翻深度控制在20 cm左右,用带深翻犁的机械把

犁底层的粘重土壤翻犁上来,使表层的轻质土壤与底层的粘重土充分混和,增加耕作层厚度。翻地垡块应整齐,深浅一致,犁底层应平整。机械插秧要求田块平整,格田内高低相差不应超过3 cm。泡田时,氮肥(尿素,225 kg/hm²)按照基肥、分蘖肥、穗肥比例为6/13、4/13、3/13施入。磷肥(P₂O₅,210 kg/hm²)作为基肥一次性施入。钾肥(K₂O,114 kg/hm²)按基肥和穗肥两次施入,各占50%。供试Cp(10 t/hm²)采用粒径为0.18~0.38 mm的自然斜沸沸石,其比表面积为670 m²/g,阳离子交换量(CEC)为135~200 cmol/kg。其主要成分为硅和铝氧化物,其中SiO₂占65.56%、Al₂O₃占10.62%、H₂O占8.16%、CaO占2.59%等。

1.3 试验设计

本试验采用随机区组试验设计,共设置5个处理,3次重复,每个处理小区面积15 m²(5 m×3 m),设置常规淹灌(CF)处理作对照,T0;AWD和Cp以及传统氮管理处理,T1;AWD和Cp以及少1/4氮(施肥比例不变,减少总施氮量)处理,T2;AWD和Cp以及少1/4磷处理,T3;AWD和Cp以及有机肥(总氮量与速效肥一致)处理,T4。其他农艺措施均依据当地习惯,其中,有机肥采用当地传统肥料。水位采用简易正负水位监测装置监测,其直径20 cm,孔距2 cm,孔径5 mm,上部10 cm位于地表以上,用于控制水层,下部50 cm打孔且埋于地表以下控制负水位。控水标准见表1。

表1 常规淹灌和干湿交替灌溉控水标准

Tab.1 Water managements for conventional flooding and alternate wet-dry irrigation						
灌溉模式	控制参数	返青-分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期和抽穗开花期	乳熟期
常规淹灌	水层深度/cm	1~7	1~7	1~7	1~7	1~7
	水层深度/cm	3~7	0~5	0	0~7	0~7
干湿交替灌溉	负水位/cm	0	-15~-5	-50~-35	-15~0	-35~-25
	土水势/kPa	0	-10~-5	-35~-25	-10~0	-25~-15

1.4 指标测定

1.4.1 水稻干物质质量和产量

在水稻每个生育期内,根据平均分蘖数在小区1 m²区域内随机选取长势均匀的3穴水稻样本,各样本根、茎、叶、穗分解并分装后,105℃杀青30 min,75℃干燥48 h至质量恒定,用电子秤称量并记录干物质质量。各小区实收计产。

1.4.2 水稻各部分氮积累量

将各部分干物质粉碎、过筛和消煮等处理后,用全自动凯氏定氮仪(Butch K-360型)测定氮素含量,并计算植株各部分总氮积累量。

1.4.3 水分生产率

水分生产率是指消耗单位水资源量所获得的产量,计算式为

$$W_p = \frac{Y}{W_T}$$

(1)

式中 W_p ——水分生产率,kg/m³
 Y ——水稻实收产量,kg/hm²
 W_T ——全生育期耗水量,m³/hm²

按照干湿交替灌溉控水标准进行水位控制后,根据简易正负水位监测装置的水位差估算耗水量。

1.4.4 水稻氮积累过程参数

采用Richards生长函数模型用于氮积累评价,

公式为^[19]

$$W=A(1+Be^{-Kt})^{-\frac{1}{N}} \tag{2}$$

式中 W ——氮积累量,g/穴
 t ——时间,d
 A ——氮积累量终值,g
 $B、K、N$ ——方程系数

对式(2)求一阶导数,可得(t 或 W 具体方程)

$$G=\begin{cases} \frac{AKBe^{-Kt}}{N(1+Be^{-Kt})^{(N+1)/N}} \\ \frac{KW}{N}\left[1-\left(\frac{W}{A}\right)^N\right] \end{cases} \tag{3}$$

式中 G ——氮累积速率,g/(穴·d)
相对累积速率为

$$R=\begin{cases} \frac{KB}{N(B+e^{Kt})} \\ \frac{K}{N}\left[1-\left(\frac{W}{A}\right)^N\right] \end{cases} \tag{4}$$

对式(2)求二阶导数,可得 G 随时间 t 而改变的速率,即

$$\frac{d^2W}{dt^2}=\frac{AK^2Be^{-Kt}}{N^2(1+Be^{-Kt})^{(2N+1)/N}}(Be^{-Kt}-N) \tag{5}$$

确定方程后,对起始生长势等指标进行统计分析,计算式分别为

$$R_0=K/N \tag{6}$$

$$t_{\max}=\frac{\ln B-\ln N}{K} \tag{7}$$

$$W_{\max}=A(N+1)^{-1/N} \tag{8}$$

$$I=\frac{W_{\max}}{A} \tag{9}$$

式中 R_0 ——起始生长势,即积累势
 $t_{\max}$ —— G 达到最大时的时间,d
 $W_{\max}$ —— G 最大时的氮积累量,g/穴

I —— G 最大时的氮积累量占氮积累量终值的比值

分别对式(3)求积分并结合氮积累量终值得到

$$\begin{cases} G_{\text{mean}}=\frac{1}{A}\int_0^A\frac{dW}{dt}dt=\frac{AK}{2(N+2)} \\ D=\frac{A}{G_{\text{mean}}}=\frac{2(N+2)}{K} \end{cases} \tag{10}$$

式中 G_{mean} ——平均累积速率,g/(穴·d)
 D ——氮积累活跃期,d

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据处理,采用 Origin 2020 对数据进行单因素随机区组方差分析,利用 LSD 法对数据均值进行多重比较,并进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理的水稻需水规律和水分生产率

表 2 为灌溉模式与不同氮肥管理模式对水稻产量、阶段耗水量和水分生产率(W_p)的影响。由表 2 可知水稻的耗水规律为:拔节孕穗期和抽穗开花期耗水量大,分蘖期和乳熟期耗水量较少。分蘖期耗水量约占总耗水量的 12.13%、拔节孕穗期为 35.86%、抽穗开花期为 25.24%,乳熟期为 23.76%,返青期仅为 3.01%。从表 2 可以看出,与 T0 相比,T1 和 T3 处理显著提高了水稻的产量,说明在节水灌溉条件下施用 C_p 容易获得高产并且具有明显节水作用。从水分生产率看,在 AWD 节水灌溉模式下,所有处理均能够节水 4.8%~11.4%,最高增产 9.7%,且 T1 和 T3 平均提高水分生产率 15.5%。说明在 AWD 节水灌溉条件下施用 C_p ,不仅产生了较为显著的节水效应还明显提高了水稻产量。

表 2 不同处理耗水规律及水分生产率
Tab.2 Water consumption and water productivity of different treatments

年份	处理	阶段耗水量/mm				总耗水量/mm	产量/(t·hm ⁻²)	W_p /(kg·m ⁻³)
		分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期			
2019	T0	93.78	296.98	176.22	181.11	748.09 ^a	7.30 ^b	0.97 ^c
	T1	88.27	283.56	164.27	172.71	708.81 ^b	8.15 ^a	1.15 ^a
	T2	82.24	270.24	152.70	159.96	665.14 ^c	7.05 ^c	1.06 ^b
	T3	88.60	282.20	165.53	174.60	710.93 ^b	8.10 ^a	1.14 ^a
	T4	87.94	280.24	165.26	176.24	709.68 ^b	8.07 ^a	1.14 ^a
2020	T0	95.19	301.43	220.78	182.92	800.33 ^a	7.79 ^b	0.97 ^b
	T1	90.04	286.40	213.27	175.30	765.00 ^b	8.40 ^a	1.10 ^a
	T2	83.06	274.29	188.80	160.76	706.92 ^c	7.08 ^c	1.00 ^b
	T3	89.93	286.43	206.58	176.35	759.28 ^b	8.34 ^a	1.10 ^a
	T4	88.82	281.64	193.31	178.88	742.66 ^b	7.83 ^b	1.05 ^{ab}

注:同列数字不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 水稻干物质质量动态变化

茎叶干物质质量随移栽时间的动态变化见图 2 (图中各处理及采样日期(第 30 天等)对应的不同颜色条带表示干物质积累量(g/穴)之和,即刻度终止值,其中,处理条带处(T0~T4)代表 5 个生育期的干物质积累量之和,而生育期时间条带处(第 30 天等)代表 5 个处理的干物质积累量之和)。茎干物质积累量在不同生育期呈递增的变化趋势,即不同处理对应条带越来越宽。拔节孕穗期至抽穗开花期干物质积累量增长率最大(30~60 d),抽穗开花期至乳熟期出现峰值。从整个生育期看,减氮肥处理(T2)降低了水稻的茎部干物质积累量,即其对应

各阶段条带明显变窄,T1 和 T3 及 T4 处理的水稻茎部干物质积累量较大。水稻叶部干物质积累量总体上均呈抛物线型曲线的变化趋势。拔节孕穗期至抽穗开花期水稻光合作用旺盛,同化产物增多,干物质积累量增长迅速(30~60 d),此后叶片逐渐干枯衰亡,部分干物质及光合作用的产物慢慢向穗部转移,干物质积累量呈明显的下降趋势。从图中茎叶不同阶段的转化来看,节水灌溉下 Cp 对茎叶干物质积累与转化影响最大的阶段为 30~60 d,淹灌下为 60 d 左右,说明节水灌溉有利于 Cp 在水稻营养阶段发挥显著作用,其对养分的缓释作用促进了该阶段干物质的积累,而相对于茎部,Cp 对叶部干物质积累的影响更为明显。

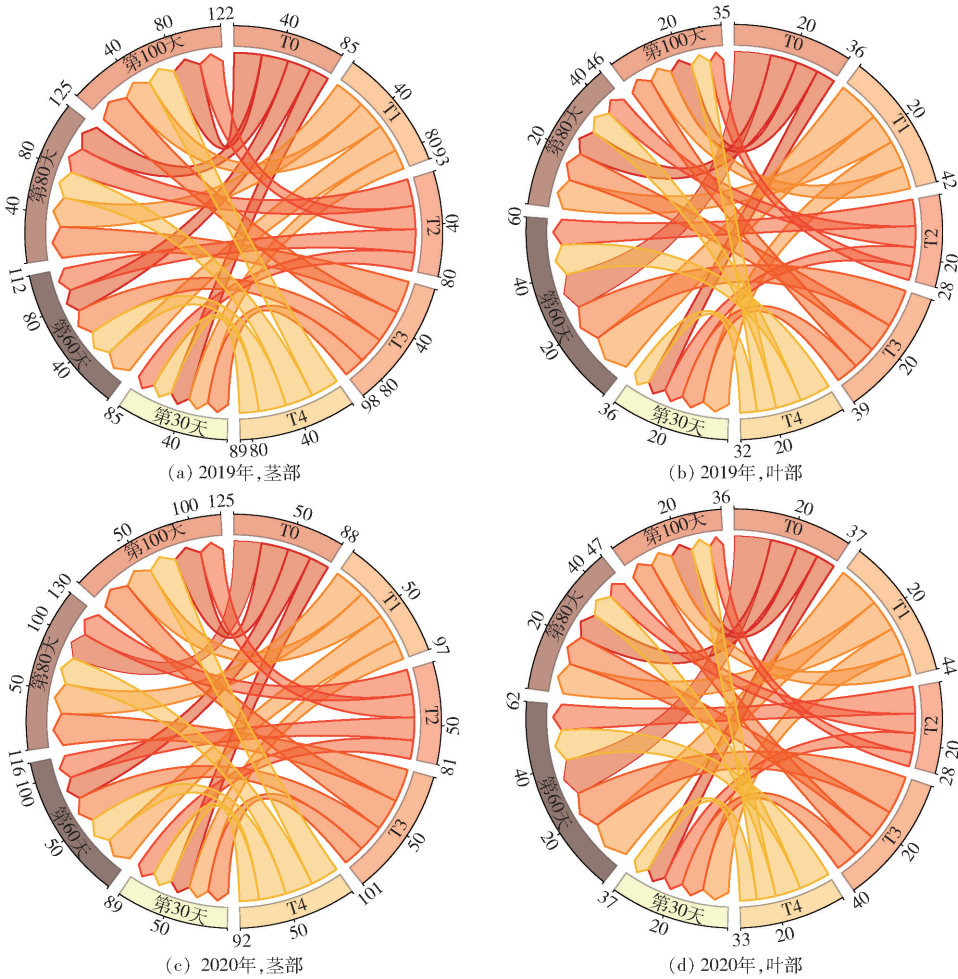


图 2 水稻茎叶干物质质量动态变化特征

Fig. 2 Dynamic variation of dry matter weight of rice stem and leaf

2.3 不同处理水稻生育末期的干物质质量和氮素分配

由表 3 可知,干物质积累量在穗部的分配比例最大,根和叶部的干物质积累量大部分集中流向穗部,其分配比例较小,尤其以叶片转化相对量最高。AWD 灌溉模式下,氮素在根系中集中可能是水稻增产的重要原因,这在 T3 和 T1 处理也得到了验证。但是,T3 和 T1 茎部干物质质量较高,因此营养生长过盛可能也是限制其产量持续增加的重要因素。对比 T3 处理和 T0 处

理可以发现,节水灌溉模式下施用 Cp 在保证作物产量的情况下可减施 25% 磷肥。与 T0 相比,T3 处理使根部干物质质量显著提高了 1.37 g/穴,茎部显著提高了 2.23 g/穴,叶部显著提高了 0.33 g/穴和穗部显著提高了 3.22 g/穴,而 T1 处理和 T4 处理穗部干物质质量最高,分别为 41.65、41.53 g/穴(两年均值),这说明施加 Cp 和增施有机氮肥等延长氮肥时效性的方法可以显著提高氮素在穗部的积累,有利于提高最终产量。

表 3 不同处理的水稻干物质质量和吸氮量

Tab.3 Dry matter weight and nitrogen uptake of rice under different treatments									g/穴
年份	处理	根干质量	根吸氮量	茎干质量	茎吸氮量	叶干质量	叶吸氮量	穗干质量	穗吸氮量
2019	T0	5.93 ^b	0.057 ^c	28.37 ^b	0.167 ^{bc}	10.4 ^b	0.084 ^c	36.81 ^b	0.398 ^{bc}
	T1	7.75 ^a	0.079 ^{ab}	32.71 ^a	0.216 ^a	11.08 ^a	0.101 ^a	42.58 ^a	0.524 ^a
	T2	5.72 ^b	0.087 ^a	24.63 ^c	0.156 ^c	9.16 ^c	0.090 ^{bc}	35.58 ^b	0.427 ^b
	T3	7.41 ^a	0.047 ^c	30.63 ^a	0.135 ^d	10.76 ^{ab}	0.071 ^d	41.03 ^a	0.374 ^c
	T4	7.21 ^a	0.071 ^b	30.65 ^a	0.181 ^b	10.82 ^{ab}	0.093 ^b	42.45 ^a	0.471 ^a
2020	T0	5.81 ^b	0.056 ^c	27.91 ^b	0.169 ^{bc}	10.29 ^b	0.082 ^b	36.56 ^b	0.391 ^{bc}
	T1	7.22 ^a	0.078 ^{ab}	32.05 ^a	0.202 ^a	10.89 ^a	0.093 ^a	40.72 ^a	0.421 ^{ab}
	T2	5.62 ^b	0.085 ^a	23.05 ^c	0.152 ^c	8.97 ^c	0.088 ^b	33.86 ^c	0.418 ^b
	T3	7.06 ^a	0.046 ^d	30.11 ^a	0.133 ^d	10.58 ^{ab}	0.071 ^c	38.79 ^{ab}	0.366 ^c
	T4	6.89 ^a	0.069 ^b	30.24 ^a	0.177 ^b	10.43 ^{ab}	0.091 ^a	40.61 ^a	0.467 ^a

2.4 水稻需氮规律

为探明辽西半干旱区水稻的需氮规律并以此指导施肥,本研究分析了两年的水稻需氮规律(图3),图中点代表每个处理需氮量均值。由于两年的需氮规律基本相同,以2020年需氮规律进行分析。图3b显示水稻5~30 d(分蘖关键期)大约需氮81.2%,30~60 d(分蘖末期和拔节孕穗期)水稻需氮14.5%,60~80 d(抽穗开花期)需氮2.1%,而乳熟期水稻需氮同样较低,仅为2.2%。上述结果表明,考虑到沸石对铵根离子吸附更强,前期氮肥以铵态氮为好,且至分蘖末期,应施入氮肥总量的80%左右;分蘖盛期后,应再考虑施入氮肥10%~15%,促控结合,确保有效分蘖率;至抽穗开花期,应酌情施入5%左右的穗肥,确保中后期足够的养分转向生

殖生长,增加颖花数量,防止颖花退化,促穗大粒重,同时具有养根、健叶、壮秆、防倒伏的作用。从图3还可以看出,水稻吸氮量总体呈现生长函数的变化规律。为了方便计算各个阶段的吸氮量和吸氮速率,即水稻需氮规律,利用Richards生长函数对水稻的需氮规律进行了拟合,也为后文分析氮素积累过程参数与产量的关系提供理论支撑。

2.5 氮素积累过程参数与产量的关系

图4为氮素积累过程参数与产量的关联关系(2020年为例),氮积累过程用图3b中的Richards方程展示。图3方程表征的各参数如表4所示。从图4和表4可以看出,氮素利用过程的参数对产量具有明显的相关关系。可以看出,T2处理减产的原因是由于氮素积累的有效期非常短或者氮肥作用的时效性较差。T1的增产机制为其主要在生长有效期内提高了氮源的积累及与最终吸氮量的比重。而T3处理增产是起始增速平稳、积累速率平稳且氮积累时间长的综合调控结果。以上分析说明,为了获得水稻高产,氮肥管理或者高效氮肥产品,在土壤的供给和水稻植株利用方面,应能够保证前期氮素积累的平稳性、提高前期氮积累总量、在一定程度上降低平均氮积累速率从而延长氮积累总时长。

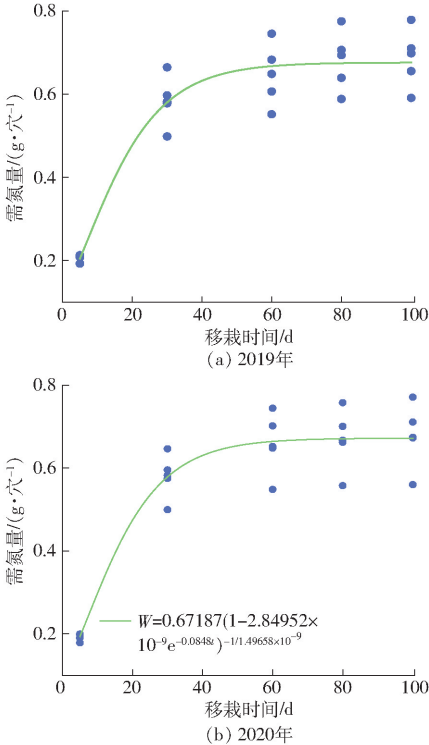


图 3 水稻需氮规律

Fig.3 Nitrogen requirement of rice

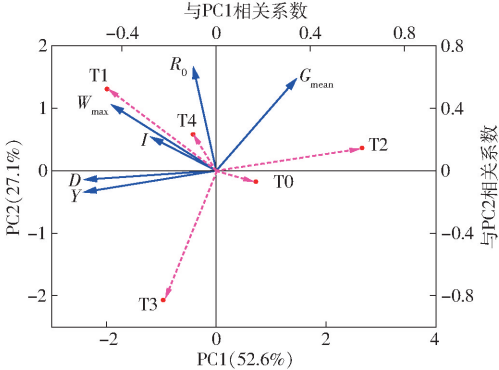


图 4 高效氮管理方式的评价指标及主成分分析
Fig.4 Evaluation index of efficient nitrogen management and its principal component analysis

表 4 Richards 方程中的主要参数
Tab.4 Main parameters of Richards equation

处理	R_0	$W_{\max}/$ ($\text{g}\cdot\text{穴}^{-1}$)	I	D/d	$C_{\text{mean}}/$ ($\text{g}\cdot\text{穴}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	$Y/$ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
T0	4.9×10^{-9}	0.240	0.37	44.8	0.015	7.54
T1	5.8×10^{-9}	0.265	0.37	50.0	0.014	8.28
T2	4.8×10^{-9}	0.215	0.37	37.4	0.016	7.07
T3	3.9×10^{-9}	0.229	0.37	47.9	0.013	8.22
T4	4.5×10^{-9}	0.258	0.37	45.8	0.015	7.95

3 讨论

3.1 AWD 灌溉对稻田节水控肥效应和水分生产率的影响

AWD 灌溉在降低水稻耗水量和提高水分利用率方面有着非常重要的作用。农田水分蒸发消耗主要取决于大气蒸发力和水汽扩散力。当进入 AWD 水分胁迫阶段,由于土壤含水率小,大气蒸发力弱,导致棵间蒸发显著降低,同时,脱落酸调节气孔开度降低,植株蒸腾也受到明显抑制,进一步提升了节水潜力;另一方面,相对于传统淹灌,AWD 通过控制水层深度继而大幅度降低稻田深层渗漏和径流损失^[5,20]。本研究表明,在不同施肥管理下,AWD 灌溉模式可显著节水 4.8% ~ 11.4%,提高水分生产率 6.2% ~ 15.5%,这与前人的研究结果基本一致。褚光等^[21]认为 AWD 灌溉降低了水稻灌溉用水量 17% ~ 18%,水分利用效率提高了 25% ~ 29%。AWD 在稻田控肥方面也发挥着重要作用。传统淹灌条件下,氮肥如尿素等首先通过水解作用(尿素分解酶催化)转化为铵态氮,由于田间水位较高、氨扩散性差,氮素主要通过挥发途径损失^[22]。而且,氨挥发速率随着田间水层的降低而逐渐增大^[23]。在淹水状态下,土壤氧化还原电位较低,虽然水稻根系能够通过细胞间氧气运输组织从大气运输氧气至根系以忍耐缺氧环境很长时间,但是由于土壤整体处于缺氧条件,导致反硝化作用对铵态氮含量的影响占据主导地位,而使氮素伴随氨挥发以 N_2 和 N_2O 的形式损失^[24-26]。淹水灌溉由于对铁离子的还原作用增强,导致磷肥的有效性增强,增加了有效磷径流和入渗风险。因此,传统淹灌会导致氮磷肥料以多种方式损失,不利于稻田土壤含蓄养分。从本研究结果看,淹灌下水稻根系氮积累量平均降低 19.6%,说明淹灌下水稻根系对养分的吸收能力受到了明显抑制,而穗质量较高则反向验证了淹灌状态氮磷的有效性高。硝态氮不易被土壤固定,当进入干湿交替周期复水阶段时,极容易发生渗漏损失^[27-28]。有学者认为,尽管 AWD 灌溉下稻田渗漏

水中铵态氮和硝态氮含量较高,但是由于节水灌溉下稻田径流量和渗漏量显著降低,使铵态氮和硝态氮的总损失较少且水分利用率最高^[29-30],因此相较于传统淹灌,AWD 更容易通过根系的生长利用这部分氮素。而对于磷肥,由于氧化电位增高,亚铁离子氧化为铁离子,在铝元素的协同下,共同将 PO_4^{3-} 吸附在土壤中,转化为无效磷,不利于作物的利用。综上,干湿交替灌溉能够有效调控氮磷的径流量并在显著削减氮磷流失量的同时,持续地提高水分利用率。本研究表明 AWD 灌溉可以在减施磷肥 25% 的同时提高水分生产率 6.2% ~ 15.5%。但是,干湿交替灌溉水分胁迫阶段,土壤氮磷有效性低、硝态氮急剧积累成为其在养分供给方面限制水稻增产的重要障碍因子。周毅等^[31]认为,在水分胁迫条件下,相对于供铵硝混合营养,提供单一氮营养的水稻根系发育好。陆大克等^[32]认为,AWD 灌溉处理土壤进氧量增加,氮肥形态增多,能够满足根系对不同形态肥料的需求,根际环境更加优越。从本研究结果看,干湿交替灌溉处理根部的吸氮量明显增加,说明干湿交替灌溉有利于根系的生长和氮的吸附。

3.2 斜发沸石对 AWD 灌溉稻田节水减肥效应的影响

斜发沸石是一种框架状结构的水合铝硅酸盐矿物质,其结构基础是硅(铝)氧四面体,在三维空间内有丰富的环和笼状结构^[12,33]。斜发沸石对水分有较强的亲和力,其结构内部有一部分水分可以因周围土壤环境的改变而失去和恢复,而且这种失水和复水的过程较为稳定^[34-35],使得其超高的持水和保肥能力有了一定的物理基础。氮肥和磷肥是养分木桶理论中最重要的因素之一,同时也符合李比希提出的最小养分限制理论^[36-37]。土壤养分总量和时效对水稻的生长起决定性的作用。研究显示当肥料过少时,土壤养分的供给不能匹配作物的需求规律造成施肥效果差。而施肥过多,容易造成土壤酸化、有机质减少,养分随径流和渗漏输出至不同水域而造成水体污染等问题^[38],不能发挥所施肥料的最佳效果。本研究发现,节水灌溉协同 Cp 的管理模式可以在降低磷肥使用量的基础上,通过激发氮磷的有效性,显著降低各个生育期水稻耗水量,有效改善稻田的土壤水分状况,从而获得较高的产量和水分利用率,这与前人的研究结果基本一致^[39]。斜发沸石由于其自身的结构特点具有很强的保肥特性,当稻田施肥量与作物需肥规律不匹配时,斜发沸石可以对养分“削峰填谷”^[16,30],随作物吸收释放养分,防止过量施肥造成径流渗漏而引起水体污染等问题,进而达到减施肥料的目的。同时通过对比本

研究中 T3 和 T0 处理,发现减少施用磷肥可以促进水稻对氮素的吸收。此外,结合斜发沸石的保肥特性,针对需氮规律进行科学平衡施肥是节约肥料的有效手段。WU 等^[16]发现,当土壤系统中 NH_4^+ 含量下降后,由于对养分“削峰填谷”的效应,斜发沸石可以将吸附的 NH_4^+ 进行解吸(20~30 d),继而延长了肥料时效和提高了氮肥利用率。斜发沸石对磷肥的增效机制为:斜发沸石吸附了磷肥中的 Ca^{2+} 或者其他阳离子等,随之引发了磷的接触溶解或溶液溶解,进而增加了土壤磷的有效性^[40-41],但是这些阳离子也参与了与 NH_4^+ 的竞争,因此适量斜发沸石投入才能够真正地用于激发氮磷的协同增产机制^[42]。斜发沸石对氮磷的控释机制是降低氮磷施用量和频率的重要技术参考^[17]。本研究发现,节水灌溉稻田施加 Cp(T1)和有机肥耦合 Cp(T4)处理可以提高穗部干物质质量 19.2%,说明施加 Cp 和增施有机氮肥等延长氮肥时效性的方法可以显著提高氮素在穗中的积累。这在主成分分析中也得到了验证,其分析结果显示高产氮肥管理模式高产,主要是由于高效氮肥处理有效地调控了氮素积累过程的 3 个重要特征(即稳、时、量),其具体结果表现为:平稳的积累过程、较长的氮积累时间和较高的前半段、全过程的氮素积累量。相反,本研究还发现,T2 处理减产的原因则为氮素积累有效期短。因此,在一定程度上降低平均氮积累速率,延长氮积累的时间

及累积量有利于提高水稻最终产量。综上,AWD 节水灌溉稻田中施加 Cp 可以在保证土壤养分总量的同时,提高氮积累时效性且降低磷肥用量。

4 结论

(1)在 AWD 灌溉稻田施加斜发沸石可以达到节水控肥的目的。相较于 CF 处理,节水灌溉条件下施用斜发沸石可以在减少 25% 磷肥的基础上,显著节水 4.8%~11.4%,提高水分生产率 6.2%~15.5%。

(2)明确了节水灌溉条件下施用斜发沸石对干物质的调控规律。AWD 下施用斜发沸石可以积极调控水稻营养阶段的干物质积累,保证了足够的氮源,提高了总干物质积累量。

(3)基于 Richards 生长函数模型,探明了辽西半干旱区水稻全生育期需氮规律,5~30 d(分蘖关键期)大约需氮 81.2%,30~60 d(分蘖末期和拔节孕穗期)需氮 14.5%,60~80 d(抽穗开花期)需氮 2.1%,而乳熟期需氮仅为 2.2%。

(4)揭示了氮积累过程参数与水稻高产的关系。在水稻氮素积累过程中,氮素积累时间(时)、总量(量)和平稳性(稳)是影响水稻产量的 3 个关键参数。T3 和 T1 处理高产的原因主要是较高的水稻前期氮素积累量、适当降低的氮素积累速率和延长的氮积累时间。

参 考 文 献

- [1] 张作合,张忠学,郑衍波,等.水炭运筹下稻田土壤氮素分布与盈亏¹⁵N 示踪分析[J/OL].农业机械学报,2020,51(6): 309-317,395.
ZHANG Zuohu, ZHANG Zhongxue, ZHENG Yanbo, et al. ¹⁵N tracer analysis of nitrogen distribution and break-even in paddy soil under water and biochar management[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 309-317, 395. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200633&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.033. (in Chinese)
- [2] 苍柏峰,姜浩,马融,等.不同施肥模式对东北粳稻产量及氮肥利用率的影响[J/OL].吉林农业大学学报,2021.
CANG Bofeng, JIANG Hao, MA Rong, et al. Effects of different fertilization patterns on yield and nitrogen use efficiency of japonica rice in Northeast China[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5952>. (in Chinese)
- [3] 张璐,黄晶,高菊生,等.长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J].农业工程学报,2020,36(5):106-112.
ZHANG Lu, HUANG Jing, GAO Jusheng, et al. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 106-112. (in Chinese)
- [4] 魏永霞,汝晨,吴昱,等.黑土区水稻生长生理特性与产量对耗水过程的响应[J/OL].农业机械学报,2018,49(9):214-225.
WEI Yongxia, RU Chen, WU Yu, et al. Response of growth physiological characteristic and yield of rice to water consumption process in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 214-225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180926&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.026. (in Chinese)
- [5] 陈伟,刘磊,刘光岩,等.辽宁中部地区水稻干湿交替灌溉试验研究[J].水利科学与寒区工程,2019,2(4):6-11.
CHEN Wei, LIU Lei, LIU Guangyan, et al. Experimental study on alternate dry-wet irrigation of rice in middle area of Liaoning Province[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2019, 2(4): 6-11. (in Chinese)
- [6] 王士杰,尹光华,李忠,等.浅埋滴灌水肥耦合对辽西半干旱区春玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):139-147.
WANG Shijie, YIN Guanghua, LI Zhong, et al. Effects of water-fertilizer coupling on the yield of spring maize under shallow-buried drip irrigation in semi-arid region of Western Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1):

- 139–147. (in Chinese)
- [7] 郭金路,尹光华,谷健,等. 基于 CROPWAT 模型的阜新地区春玉米灌溉制度的确定[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3428–3434.
GUO Jinlu, YIN Guanghua, GU Jian, et al. Determination of irrigation scheduling of spring maize in different hydrological years in Fuxin, Liaoning Province based on CROPWAT model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3428–3434. (in Chinese)
- [8] 李坤衡,吕刚,秦伟,等. 辽西半干旱区典型城市土壤入渗特性[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 53–61.
LI Kunheng, LÜ Gang, QIN Wei, et al. Infiltration characteristics of urban soil in semi-arid area of Western Liaoning Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 53–61. (in Chinese)
- [9] 冯良山,孙占祥,郑家明,等. 辽西风沙半干旱区旱作农田水资源研究[J]. 土壤通报, 2008(1): 25–28.
FENG Liangshan, SUN Zhanxiang, ZHENG Jiaming, et al. Study of farmland water resources in the sandy and windy semi-drought area of Western Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008(1): 25–28. (in Chinese)
- [10] 迟道才,王殿武. 北方水稻节水理论与实践[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003.
- [11] 彭世彰,徐俊增. 水稻控制灌溉理论与技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011.
- [12] 陈涛涛,孙德环,张旭东,等. 干湿交替灌溉下水氮耦合对沸石处理稻田产量和水氮利用的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 154–162.
CHEN Taotao, SUN Dehuan, ZHANG Xudong, et al. Impact of water-nitrogen coupling on grain yield, water and nitrogen usage in zeolite-amended paddy field under alternate wetting and drying irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 154–162. (in Chinese)
- [13] 吴奇. 斜发沸石对水稻节水增产及控氮机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
WU Qi. Research on the mechanism of clinoptilolite on water saving, increasing yield and nitrogen control of rice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [14] WU Q, CHI D, XIA G, et al. Effects of zeolite on drought resistance and water-nitrogen use efficiency in paddy rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2019, 145(11): 4019024.
- [15] 迟道才,孙一迪,吴奇,等. 肥与沸石对节水稻作产量及氮素吸收利用的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(5): 588–595.
CHI Daocai, SUN Yidi, WU Qi, et al. Effect of fertilizer and zeolite on rice yield and nitrogen utilization under water saving irrigation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(5): 588–595. (in Chinese)
- [16] WU Q, WANG Y, CHEN T, et al. Soil nitrogen regulation using clinoptilolite for grain filling and grain quality improvements in rice[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104547.
- [17] WU Q, CHEN T, CHI D, et al. Increasing nitrogen use efficiency with lower nitrogen application frequencies using zeolite in rice paddy fields[J]. International Agrophysics, 2019, 33(2): 263–269.
- [18] 陈涛涛,吴奇,郑俊林,等. 基于斜发沸石的水氮耦合效应对水稻产量影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(增刊1): 71–76.
CHEN Taotao, WU Qi, ZHENG Junlin, et al. Effect of water and nitrogen coupling on rice yield based on clinoptilolite[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Supp. 1): 71–76. (in Chinese)
- [19] 朱庆森,曹显祖,骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. 作物学报, 1988, 14(3): 182–193.
- [20] 张鲜鲜,周胜,孙会峰,等. 干湿交替灌溉对水稻生产和温室气体减排影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3873–3880.
ZHANG Xianxian, ZHOU Sheng, SUN Huifeng, et al. Impacts of alternate wetting and drying irrigation on rice production and the mitigation of greenhouse gas emission in paddy fields[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3873–3880. (in Chinese)
- [21] 褚光,展明飞,朱宽宇,等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1026–1036.
CHU Guang, ZHAN Mingfei, ZHU Kuanyu, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1026–1036. (in Chinese)
- [22] CAO Y, TIAN Y, YIN B, et al. Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency[J]. Field Crops Research, 2013, 147: 23–31.
- [23] HUDA A, GAIHRE Y K, ISLAM M R, et al. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 104(1): 53–66.
- [24] ZAMAN M, NGUYEN M L. Effect of lime or zeolite on N_2O and N_2 emissions from a pastoral soil treated with urine or nitrate-N fertilizer under field conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 136(3–4): 254–261.
- [25] PENG S, YANG S, XU J, et al. Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1581.
- [26] ZHANG Y, LIU J, MU Y, et al. Nitrous oxide emissions from a maize field during two consecutive growing seasons in the North China Plain[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(1): 160–168.
- [27] PENG S, YANG S, XU J, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(3): 333–342.
- [28] ZHAO J, WANG B, JIA Z, et al. Phylogenetically distinct phylotypes modulate nitrification in a paddy soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, 81(9): 3218.
- [29] BIN D. Study on environmental implication of water saving irrigation in Zhanghe irrigation system[R]. The Project Report Submitted to Regional Office for Asia and the Pacific, FAO, 2016.

1739 – 1743.

LIU Chang, ZHAO Chunyu, HAN Yanglong, et al. Calculation method for load distribution of ball screw nut pairs[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2019, 40(12):1739 – 1743. (in Chinese)

- [10] CHEN Y J, TANG W C. Dynamic contact stiffness analysis of a double-nut ball screw based on a quasi-static method[J]. Mech. Mach. Theory, 2014,73:76 – 90.
- [11] ZHEN N, AN Q. Analysis of stress and fatigue life of ball screw with considering the dimension errors of balls[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018,137: 68 – 76.
- [12] LIN B, OKWUDIRE C E, WOU J S. Low order static load distribution model for ball screw mechanisms including effects of lateral deformation and geometric errors[J]. Journal of Mechanical Design, 2018,140(2):022301.
- [13] ZHAO J J, LIN M X, SONG X C, et al. Investigation of load distribution and deformations for ball screws with the effects of turning torque and geometric errors[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019,141:95 – 116.
- [14] BERTOLASO R, CHEIKH M, BARRANGER Y, et al. Experimental and numerical study of the load distribution in a ball-screw system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(4):1411 – 1420.
- [15] DU Z, ZHANG X L, TAO T, et al. Study of the dynamic characteristics of ball screw with a load disturbance[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(2016): 8208241.
- [16] Vocabulary and designation: ISO 3408 – 1: 2006 [S].
- [17] Static axial rigidity: ISO 3408 – 4: 2006 [S].
- [18] LIU C, ZHAO C, MENG X, et al. Static load distribution analysis of ball screws with nut position variation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020,151: 103893.

(上接第 313 页)

- [30] 叶玉适. 水肥耦合管理对稻田生源要素碳氮磷迁移转化的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
YE Yushi, Migration and transformation of C, N and P in rice paddy fields under different water and fertilizer management practices[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [31] 周毅, 郭世伟, 宋娜, 等. 供氮形态和水分胁迫对苗期—分蘖期水稻光合与水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006,12(3): 334 – 339.
ZHOU Yi, GUO Shiwei, SONG Na, et al. Effects of nitrogen forms and water stress on photosynthesis and water use efficiency of rice at seeding-tillering stage [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006, 12(3): 334 – 339. (in Chinese)
- [32] 陆大克, 段骅, 王维维, 等. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1362 – 1372.
LU Dake, DUAN Hua, WANG Weiwei, et al. Comparison of rice root development and function among different degrees of dry-wet alternative irrigation coupled with nitrogen forms[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1362 – 1372. (in Chinese)
- [33] WANG X, QIAO B, LI S, et al. Using natural Chinese zeolite to remove ammonium from rainfall runoff following urea fertilization of a paddy rice field[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(6): 5342 – 5351.
- [34] IPPOLITO J A, TARKALSON D D, LEHRSCHE G A. Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth[J]. Soil Science, 2011, 176(3): 136 – 142.
- [35] GHOLAMHOSEINI M, GHALAVAND A, KHODAEI-JOGHAN A, et al. Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 193 – 202.
- [36] REJESUS R M, PALIS F G, RODRIGUEZ D G P, et al. Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: evidence from rice producers in the Philippines[J]. Food Policy, 2011, 36(2): 280 – 288.
- [37] CABANGON R J, TUONG T P, CASTILLO E G, et al. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China[J]. Paddy and Water Environment, 2004, 2(4): 195 – 206.
- [38] ROBERTS T L. Improving nutrient use efficiency[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2008, 32(3): 177 – 182.
- [39] SEPASKHAH A R, BARZEGAR M. Yield, water and nitrogen-use response of rice to zeolite and nitrogen fertilization in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 38 – 44.
- [40] 莫慧明, 王光火, 朱祖祥. 天然沸石作为离子交换肥料的研究——Ⅱ斜发沸石对磷矿石的溶解及对土壤有效磷的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1990, 16(3): 229 – 232.
- [41] WU Q, XIA G, CHEN T, et al. Effects of nitrogen and zeolite on rice grain yield, water and nitrogen use, and soil total nitrogen in coastal region of Northeast China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(18): 2103 – 2114.
- [42] WU Q, XIA G, CHEN T, et al. Impacts of nitrogen and zeolite managements on yield and physicochemical properties of rice grain[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5): 93 – 100.