

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

陈涛涛¹, 孙德环², 张旭东¹, 吴奇¹, 郑俊林¹, 迟道才^{1*}

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 东港市灌溉新技术试验站, 东港 118300)

摘要: 为了明确斜发沸石在干湿交替稻田中的应用潜力, 运用离心机法测定不同斜发沸石处理下稻田土壤水分特征曲线, 分析了斜发沸石对土壤持水性能的影响; 运用自动遮雨棚蒸渗仪进行了灌溉-施氮-沸石的综合水稻栽培试验, 明确了斜发沸石和氮肥对干湿交替稻田阳离子交换量、产量、水氮利用率及稻米蛋白质含量的影响及机理。结果表明: 稻田土壤基质势在-35~0 kPa 范围内, 增施斜发沸石可明显提高土壤持水性能, 改善土壤水分状况, 在持续淹灌和干湿交替灌溉条件下均能提高水分生产率, 且后者更为明显; 增施斜发沸石可增强土壤阳离子交换量, 从而提高保肥能力和氮肥利用率, 尤其是 10~15 t/hm² 的斜发沸石同 105 kg/hm² 的氮肥混施可显著提高氮肥农艺利用率和稻米蛋白质含量; 增施斜发沸石可增产 4.7%~16.8%, 且可优化水肥耦合, 避免在高氮水平下干湿交替灌溉增产效果低于持续淹灌的现象。与常规施氮的淹灌稻田相比, 干湿交替灌溉稻田施用 10 t/hm² 斜发沸石和 105 kg/hm² 的氮肥, 可减少 27.8% 的耗水量和 33.3% 的施氮量, 增产 10.6%, 进而显著提高氮肥利用效率 (89.2%) 和水分生产率 (52.5%), 且这些正效应至少可持续 2 年。

关键词: 沸石; 氮; 灌溉; 水稻; 干湿交替; 水分生产率; 阳离子交换量; 土壤持水率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.021

中图分类号: S274.3; S365

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-22-0154-09

陈涛涛, 孙德环, 张旭东, 吴奇, 郑俊林, 迟道才. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.021 <http://www.tcsae.org>
Chen Taotao, Sun Dehuan, Zhang Xudong, Wu Qi, Zheng Junlin, Chi Daocai. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 154-162. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.021 <http://www.tcsae.org>

0 引言

全世界有 1/3 以上的人口以水稻为主粮。但水稻是一种高耗水作物, 其耗水量是其他粮食作物的 2~3 倍。全球农业用水中, 约有 73% 用于亚洲农业生产, 而其中 75%~80% 的水资源消耗在水稻灌溉上^[1-2]。中国作为水稻生产大国, 水稻耗水约占中国年用水量的 50%。水稻也是耗肥大户, 中国平均施氮量约为 190 kg/hm², 是世界平均水平的 1.9 倍^[3], 局部地区甚至超过 300 kg/hm²。据国际化肥工业协会 2010 年统计, 中国水稻耗氮量约占全球总量的 31.3%^[4]。过量施肥在提高水稻产量的同时, 造成了氮肥利用率的降低, 也导致了地下水污染、大气污染和大量水域富营养化等一系列的环境问题^[5-8]。因此, 在确保水稻产量安全的同时, 研究如何降低水稻生产系统的资源消耗和环境代价具有重要的意义。

干湿交替灌溉是稻田众多节水技术中使用最广的一种灌溉方式, 在中国、印度、菲律宾、日本、越南、英国等国家都得到了广泛的认可和应用。然而, 干湿交替

灌溉也有不利的一面。在干湿交替灌溉驱动下, 稻田土壤总是处于土壤水饱和与非饱和、土壤氧化与还原快速更替的环境中。这改变了稻田氮循环过程, 导致更多的 NH₃ 挥发^[9-10]、硝化-反硝化作用^[11]和淋溶流失^[9-12], 并诱发温室气体 N₂O 的排放^[12], 最终增加了氮肥流失。因此, 应用干湿交替灌溉在实现水稻节水、增产和稳产的同时, 必须解决其对稻田氮素吸收率低和氮素损失的不利影响。

斜发沸石是一种多孔水合铝硅酸盐矿物质, 具有极易截留和释放水分、交换阳离子且不改变结构的特征^[13-14]。因其具有极强的阳离子交换能力、丰富的比表面积和分子筛等特性, 加之廉价且可人工合成, 已在酸性、中性和碱性等不同土壤^[15-17]和玉米、小麦、大豆等多种旱作物^[18]上得到了广泛应用并取得了明显效果。近年来, 斜发沸石在稻田等淹水环境下的相关研究也相继展开^[19-22], 但在干湿交替灌溉下对水稻农艺性状、水氮资源利用等影响的研究较少、机理也尚不清楚。因此, 本文在干湿交替灌溉下探讨斜发沸石和氮肥对水稻农艺性状、水氮资源利用等影响, 以期明确斜发沸石在干湿交替稻田中的应用潜力, 揭示斜发沸石对节水、节肥、增产和提高水氮利用效率等的效应及其后效性。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012—2013 年在辽宁省滨海地区东港灌溉试验站进行 (113°34'43"E, 39°52'38"N, 海拔 8.1 m)。土

收稿日期: 2016-03-26 修订日期: 2016-10-24

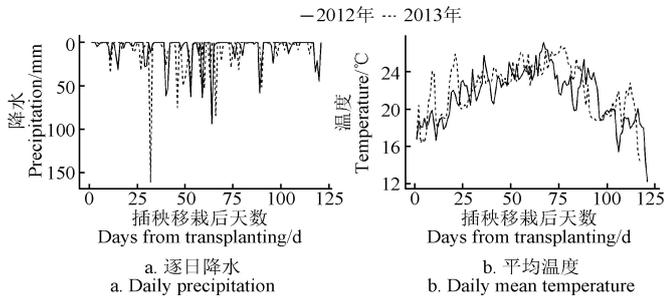
基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项项目(201303125); 国家自然科学基金(51679142); 辽宁省特聘教授基金项目(2013)。

作者简介: 陈涛涛, 男, 黄冈人, 博士, 主要从事水肥调控与高效利用研究。沈阳 沈阳农业大学水利学院, 110866. Email: ttchen@outlook.com

*通信作者: 迟道才, 男, 大连人, 教授, 博士生导师, 主要从事水肥调控与高效利用研究。沈阳 沈阳农业大学水利学院, 110866。

Email: daocaichi@vip.sina.com

壤质地为粉砂壤土，容重 1.35 g/cm^3 ，土壤肥力偏下，速效钾 56.57 mg/kg ，速效磷 42.47 mg/kg ，土壤碱解氮 34.82 mg/kg ，全氮 0.97 g/kg ，有机质 8.95 mg/kg ，土壤 pH 值为 6.51。两年间水稻生育期内的逐日降水和平均温度如图 1 所示。



注：水稻 2012 和 2013 移栽插秧日期分别为 6 月 3 日和 6 月 1 日。
Note: Rice was transplanted on June 4 in 2012 and June 1 in 2013, respectively.

图 1 水稻移栽后生育期逐日降水及日平均温度

Fig.1 Daily precipitation and mean temperature during rice growth stage after transplanting

1.2 试验材料

供试稻种采用丹东当地普遍种植的港育 6 号，分别于 2012 年 6 月 3 日和 2013 年 6 月 1 日插秧，行距为 30 cm，株距为 14 cm，每穴插 3 株。供试肥料为尿素、硫酸钾和过磷酸钙。氮肥按照基肥:分蘖肥:穗肥为 6:3:1 的比例施肥（纯氮）。磷肥（ P_2O_5 ， 172 kg/hm^2 ）作为基肥一次性施入。钾肥（ K_2O ， 72 kg/hm^2 ）按基肥和穗肥两次施入，各占 50%。供试沸石采用粒径为 0.18~0.38 mm 的自然斜发沸石，其比表面积为 $670 \text{ m}^2/\text{g}$ ，阳离子交换量（CEC）为 135~200 cmol/kg 。硅和铝氧化物是其主要成分，其中 SiO_2 占 65.56%、 Al_2O_3 占 10.62%、 H_2O 占 8.16%、 CaO 占 2.59% 等。

1.3 试验设计

采用裂-裂-裂区试验设计，设 4 个因子（年份、灌溉模式、施氮量和施沸石量），共 4 次重复。主区为沸石应用后的年数（2 个水平，1 年和 2 年）；子区为灌溉模式，包括持续淹灌（ I_{CF} ）和干湿交替灌溉（ I_{AWD} ）2 水平；子子区为施氮量，施氮量包括 0、52.5、105 和 157.5 kg/hm^2 4 个水平，分别用 N_0 、 $N_{52.5}$ 、 N_{105} 和 $N_{157.5}$ 表示；子子子区为施沸石量，包括 0、5、10 和 15 t/hm^2 4 个水平，用 Z_0 、 Z_5 、 Z_{10} 和 Z_{15} 表示。为了探索沸石增产保肥的后效性，2013 年重复 2012 年试验，但不施沸石。两年间各处理所使用小区完全相同。各试验处理均在非称重式蒸渗仪（长×宽×高为：2.55 m×2.62 m×2.5 m）中进行，共 18 个，分 2 排沿东西向布置，每个蒸渗仪用 40 cm 高的塑料池埂隔成 4 个小区，其中 30 cm 插入土壤中防止营养物质侧流，小区面积为 1.67 m^2 。每个蒸渗仪中 4 小区水肥处理一致，且按照 2.5 mm/d 进行模拟排水。每日 8 点、14 点定时读取土壤基质势（控水时期）和水位（非控水时期）。土壤基质势采用南京土壤所研制的水银负压计来测定，水位由简易水位计来观测。持续淹灌和干湿交替灌溉在水稻不同生育期的控水标准见表 1。在蒸渗仪进水管安装水表（宁波 LXS-15F）用以监测用水量。每次

灌水的灌水量由进水管水表的前后读数差确定。雨天采用自动挡雨棚进行遮雨处理，其他田间管理和栽培技术均按常规进行。

表 1 2012 和 2013 年持续淹灌和干湿交替灌溉的控水标准
Table 1 Water managements for continue flooding and alternate wetting and drying at each growth stage in 2012 and 2013

生育期 Growth stages	持续灌溉	干湿交替灌溉	
	I_{CF}	I_{AWD}	
	水层深度范围 Depth of water layer/cm	最大水层深度 Maximum depth of water layer/cm	土壤水分控水下限 Low limit of soil water potential/kPa
返青期 Seedling recovery stage	1~5	3~5	0
分蘖前期 Initial tillering stage	1~5	3	-10~-5
分蘖后期 Final tillering stage	1~5	0	-35~-25
拔节孕穗期 Jointing-booting stage	1~5	3	-10~-5
抽穗开花期 Heading-flowering stage	1~5	3	-10~-5
乳熟期 Milky ripening stage	1~5	3	-20~-10
黄熟期 Yellow ripening stage	落干	落干	—

注：水银负压计陶土头中心安装深度为 12 cm， I_{CF} 表示持续淹灌， I_{AWD} 表示干湿交替灌溉，下同。

Note: Sensor of each mercury manometer tensiometer was installed at the depth of 12 cm, I_{CF} indicates the continuous flooding irrigation; I_{AWD} indicates the alternate wetting and drying irrigation, the same below.

1.4 观测项目与方法

1.4.1 水稻产量和植株地上部分氮积累量

黄熟期结束后，在小区中间 1 m^2 区域随机选取水稻 3 穴样本，各样本经分解、分装后， $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘烤 48 h 至恒质量，并测定干质量。再经过粉碎、过筛和消煮等处理后，用全自动凯氏定氮仪（Foss KJELTEC 2300）测定氮素含量，并计算植株地上部分总氮积累量。各小区实收计产。

1.4.2 水分生产率和氮肥农艺利用率

水分生产率（Water Productivity (WP) kg/m^3 ）是指消耗单位水资源量所获得的产量。

全生育期总耗水量（ W_T ）

$$W_T = P + I + K + (W_0 - W_Y) \quad (1)$$

式中 P 为全生育期的降水量， m^3/hm^2 ； I 为全生育期总灌水量， m^3/hm^2 ； K 为地下水补给量， m^3/hm^2 。由于蒸渗仪设有自动挡雨棚，降水量和地下水补给均为零。泡田前（ W_0 ）和黄熟后（ W_Y ）土壤储水量变化用差补法精确计算

$$W_0 - W_Y = I_Y - I_0 \quad (2)$$

式中 I_0 为首次灌水（泡田）至 5 cm 稳定水层时的总灌水量， m^3/hm^2 ； I_Y 为水稻黄熟秋收后再次灌水至 5 cm 稳定水层的总灌水量， m^3/hm^2 。

按照（3）式计算水分生产率

$$WP = \frac{Y}{W_T} \quad (3)$$

式中 Y 为水稻实收产量， kg/hm^2 。而氮肥农艺利用率（Nitrogen use efficiency (NUE) kg/kg ）按（4）式计算

$$NUE = \frac{Y_i - Y_0}{N_f} \quad (4)$$

式中 N_f 为各处理实际施氮量, kg/hm^2 ; Y_0 为持续淹灌下无氮无沸石处理 ($I_{CF}N_0Z_0$) 的水稻产量, kg/hm^2 ; Y_i 为施氮量为 N_f 处理下的产量, kg/hm^2 。

1.4.3 土壤阳离子交换量 (CEC)

水稻收获后用土钻按“S”形采集各小区表层 (0~30 cm) 和深层 (30~60 cm) 土壤各 5 个点, 组成两个混合土样。每个混合土样去除动、植物残体及砾石后, 碾磨、过 2 mm 土筛并混匀, 自然风干后过 0.15 mm 土筛。称取土样 2.00 g 放入 100 mL 离心管中, 用 1 mol/L 中性乙酸铵溶液淋洗土样至无钙离子反应为止, 用 NH_4^+ 饱和土壤。再用 95% 乙醇洗去过量的 NH_4^+ , 然后加氧化镁, 用全自动凯氏定氮仪 (Foss KJELTEC 2300) 测定土样交换的总 NH_4^+ 量。

1.4.4 稻米蛋白质含量

稻粒自然风干 60 d 后 (确保稻粒含水量在 12%~14% 范围内), 取各处理稻粒 300 g 进行品质性状测定。采用 FC2K 型糙米机 (YAMAMOTO) 去壳、YAMAMOTO 公司 VP-32 型精米机去糙, 得到精米后, 再采用 Foss Tecator 公司的 InfratecTM 1241 (PS-500) 近红外快速品质分析仪测定稻米蛋白质含量。

1.4.5 土壤水分特征曲线

土样采集于 0~10 cm 耕作土层, 根据 $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$ 实际容重进行人工装填, 斜发沸石混掺比例设置为 0、0.37%、0.74% 和 1.11% (质量分数), 等效于稻田 10 cm 土层施斜发沸石 0、5、10 和 15 t/hm^2 。试验开始前将全部环刀样品置于蒸馏水中饱和和处理 48 h, 试验结束后置于 105 °C 恒温箱内干燥 24 h, 以计算土壤含水量。采用离心法测定土壤水分特征曲线, 具体步骤参照文献[23]。各处理重复 3 次, 取均值作为结果。

1.5 统计分析方法

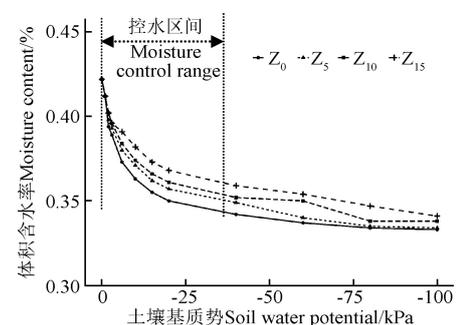
除土壤水分特征曲线观察值外, 其他指标均按裂-裂-裂区试验设计分析, 方差分析采用 SAS 9.2 软件实现。裂-裂-裂区试验设计多层次模型的固定因子分别为: 年份 (Y)、灌溉模式 (I)、施氮量 (N) 和斜发沸石 (Z), 随机因子为: 区组 (B)。因此, 该模型的主、子、子子和子子子子区误差项依次为: $B \times Y$ 、 $B \times Y \times I$ 、 $B \times Y \times I \times N$ 和 $B \times Y \times I \times N \times Z$ 。主因子和交互因子事后均值差异检测采用 Tukey's HSD 方法, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。Tukey's HSD 检测所使用的误差项须和因子同属一层。方差贡献率分析用于量化主因子和交互因子对各指标的影响大小和主要影响因子的筛选。本研究只对方差分析显著且方差贡献率超过 2.5% 的因子进行分析, 并将贡献率超过 10% 的因子定义为主控因子。

2 结果与分析

2.1 斜发沸石对土壤持水性能的影响

稻田表层土壤不同斜发沸石混掺比的实测土壤水分特征曲线如图 2 所示。由 2 图可知, 斜发沸石对土壤持水性能具有显著的影响。随着斜发沸石混掺比的增大,

土壤水分特征曲线在不同土壤基质势下均有不同程度的提高, 尤其在干湿交替灌溉-35~0 kPa 控水范围内, 斜发沸石对土壤含水率增效明显且稳定。因此, 在相同水分胁迫下, 增施斜发沸石可明显提高土壤含水量, 增强土壤保水能力。此外, 土壤基质势在-35~0 kPa 范围内, 斜发沸石对土壤保水能力增效随土壤缺水程度的增加而提高, 而过分缺水后沸石的增效则有所下降。如在一般缺水 (基质势为 20 kPa 左右) 条件下, 增施斜发沸石 5、10 和 15 t/hm^2 分别提高土壤体积含水率 3.0%、4.1% 和 6.1%; 在极其干旱 (基质势为-100~-70 kPa) 条件下, 仍有明显效果, 但增效有所下降。由此可知, 稻田增施斜发沸石可提高土壤持水性能, 改善稻田土壤水分状况, 在干湿交替灌溉轻度水分胁迫条件下表现得尤为明显。



注: Z_0 、 Z_5 、 Z_{10} 和 Z_{15} 分别表示 0、5、10、15 t/hm^2 斜发沸石
Note: Z_0 , Z_5 , Z_{10} and Z_{15} indicates 0, 5, 10, and 15 t/hm^2 zeolite amended, respectively.

图 2 稻田表层土壤不同斜发沸石混掺比下的土壤水分特征曲线变化特征

Fig.2 Soil moisture characteristic curve of surface paddy soil amended with different zeolite rates

2.2 斜发沸石对稻田 CEC 的影响

斜发沸石 (Z) 和 $I \times N \times Z$ 交互对稻田表层土壤 (0~30 cm) CEC 有显著的影响 (表 2), 而施氮量和灌溉模式影响不大。表 2 表明, 增施斜发沸石显著提高表层土壤的 CEC。相对于 Z_0 水平, Z_5 、 Z_{10} 、 Z_{15} 水平的土壤 CEC 分别提高 24.3%、46.3% 和 81.9%。对于 30~60 cm 土层的 CEC 除 $I \times N \times Z$ 交互外, 其他主效应和交互效应均不显著。

2.3 斜发沸石与不同水氮组合对水稻产量的影响

灌溉模式 (I)、施氮量 (N) 和斜发沸石 (Z) 及其交互因子 ($I \times N$ 、 $I \times Z$ 、 $N \times Z$ 和 $I \times N \times Z$) 对水稻产量均有显著影响 (表 2)。但只有灌溉模式、施氮量、斜发沸石和 $I \times N$ 交互因子具有较高的方差贡献率。在试验设计范围内, 贡献率具体表现为: 施氮量 (65.3%) > 斜发沸石 (6.3%) > 灌溉模式 (4.8%) > $I \times N$ 交互 (4.2%)。可见, 施氮量是水稻增产的主控因子, 斜发沸石次之。

不同灌溉模式、施氮量和沸石修补下水稻平均产量见图 3。Tukey's HSD 检测结果表明, 增施氮肥、沸石和应用干湿交替灌溉均显著提高水稻产量。(1) 氮肥方面: 当施氮量超过 105 kg/hm^2 后, 继续增施氮肥, 增产效果不明显 (表 3); (2) 沸石方面: 10 t/hm^2 沸石用量增产效果最好, 低于 5 t/hm^2 增产不明显, 高于 10 t/hm^2 也无

显著的提升空间；(3) 干湿交替灌溉方面：应用干湿交替灌溉较持续淹灌可增产 11.5%。I×N 交互对水稻产量也具有显著的影响。由图 4 可知，两种灌溉模式下水稻产量均随着施氮量的增加而提高，但是在高氮水平 (N_{157.5}) 下，干湿交替灌溉增产效果并不明显，甚至略低于持续淹灌，这可能与高氮处理下稻田在干湿交替灌溉下氮肥流失较大有一定关系^[9-11]。I×N×Z 交互效应 (图 3) 分析

进一步表明，在 Z₀ 下，干湿交替灌溉在 3 个低氮水平的产量表现的确优于持续淹灌，但在高氮水平下干湿交替灌溉却要低于持续淹灌。在 Z₅ 下，也观察到类似的规律，但 Z₁₀ 之后，尤其在 Z₁₅ 下，干湿交替灌溉在 4 个施氮水平下的增产效果均要优于持续淹灌。多重对比发现，I_{AWD}N₁₀₅Z₁₀ 处理产量最高 (9.8 t/hm²)，显著高于常规处理 (I_{CF}N_{157.5}Z₀)，可增产 10.6%。

表 2 裂-裂-裂区试验设计方差分析及方差贡献率分析

Table 2 ANOVA for a split-split-split plot experiment and proportion of variance explained by main effects and interactions for each response variable

变异来源 Source	不同土层阳离子交换量 CEC in different soil profiles		产量 Grain Yield	水分生产率 Water productivity	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency	稻米蛋白质含量 Protein content
	0~30 cm	>30~60 cm				
Y	0.04	0.14	0.02	0.06	0.06	3.87
I	0.72	8.89	4.84**	45.10**	2.46**	0.08
Y×I	0.11	0.13	0.08	0.19	0.07	0.01
N	0.98	5.25	65.25**	24.53**	44.49**	22.68**
Y×N	0.06	0.04	0.05	0.08	0.60**	0.99
I×N	2.54	9.98	4.20**	1.23**	1.12**	0.36
Y×I×N	0.06	0.13	0.08	0.14	0.05	5.90*
Z	40.71**	12.20	6.31**	9.88**	15.61**	45.82**
Y×Z	0.03	0.12	0.05	0.07	0.11	0.24
I×Z	3.01	1.10	1.70**	1.83**	1.11	0.08
N×Z	2.76	6.81	2.27**	1.85**	7.80**	0.71
Y×I×Z	0.04	0.06	0.19	0.11	0.20	0.44
Y×N×Z	0.11	0.15	0.25	0.21	0.41	0.55
I×N×Z	13.32**	10.36**	1.64**	1.86**	1.80	0.53
Y×I×N×Z	0.16	0.12	0.49	0.82	0.51	0.46
总贡献率 Total contribution rate / %	64.52	68.59	87.45	88.07	77.26	83.84

注：表中数值表示各主因子和交互因子的方差贡献率 (%)。Y、I、N、和 Z 分别为 4 个主因子：年、灌溉模式、施氮量和沸石修补。*表示影响显著 P<0.05，**表示影响极显著 P<0.01。

Note: Data was proportion of variance explained by each main effect and interaction. The four main factors of Y, I, N, and Z indicate year, irrigation regimes, nitrogen application, and zeolite amendment, respectively. *, and ** indicate no significant, significant at p < 0.05, extremely significant effect at p < 0.01.

表 3 各主因子不同水平间多重比较分析 (Tukey's HSD test)

Table 3 Multiple comparison (Tukey's HSD test) between different levels of each main factor for each response variable

主因子 Main Factors	阳离子交换量 CEC ₀₋₃₀ / (cmol·kg ⁻¹)	产量 Grain yield/ (t·hm ⁻²)	水分生产率 Water productivity/ (kg·m ⁻³)	氮肥利用效率 NUE/ (kg·kg ⁻¹)	稻米蛋白质含量 Protein content/%	
年 year	2012	15.09a	7.47a	0.83a	40.34a	6.08a
	2013	14.88a	7.42a	0.81a	41.09a	5.83a
灌溉模式 Irrigation regimes	I _{CF}	15.42a	7.04b	0.64b	38.38b	5.98a
	I _{AWD}	14.55a	7.85a	1.00a	43.05a	5.93a
施氮量 N application rates/(kg·hm ⁻²)	0	14.78a	5.15c	0.60c	/	5.70b
	52.5	15.43a	7.16b	0.82b	52.89a	5.67b
	105	15.49a	8.61a	0.94a	40.68b	5.81b
	157.5	14.26a	8.86a	0.92a	28.59c	6.64a
沸石量 Z amendment rates/(t·hm ⁻²)	0	10.85c	6.85b	0.71c	33.01c	5.10c
	5	13.49bc	7.17b	0.77b	38.16b	5.77b
	10	15.87b	7.76a	0.88a	42.72b	6.50a
	15	19.74a	8.00a	0.92a	48.97a	6.45a

注：同一列不同字母表示具有显著的差异，相同字母表示没有差异。为了分析沸石水稻产量影响的后效应，两年的水稻产量均按照烘干恒重后的 1/ (1-14%) 倍计，即 14% 的含水率计。

Note: Different lowercase letters in columns are significantly different at 0.05 probability level. Drying processes were used to calculate real grain yield by dry grain yield divided by 1-14% for after-effect analysis of zeolite.

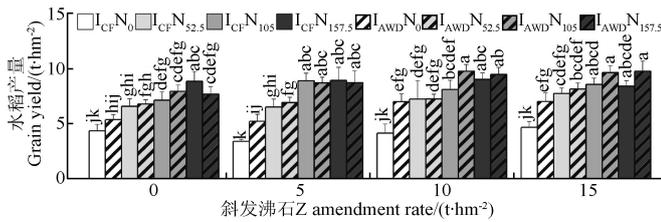


图3 不同灌溉模式、施氮量和沸石修补下水稻平均产量及三者交互效应

Fig.3 Mean rice yield under different combinations of irrigation regimes, nitrogen application rates and zeolite amendment rates, and interaction effect among them

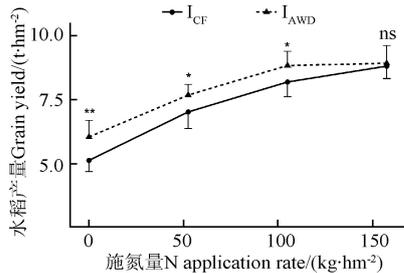


图4 水肥交互作用对水稻产量的影响

Fig.4 Interaction effects of I×N on grain yield

2.4 斜发沸石与不同水氮组合对水分生产率的影响

灌溉模式 (I)、施氮量 (N) 和斜发沸石 (Z) 以及交互因子 (I×N, I×Z, N×Z 和 I×N×Z) 对水分生产率 (WP) 均具有显著性的影响 (表 2)。但只有 3 个主因子对 WP 的方差贡献率超过了 2.5%，具体表现为：灌溉模式 (45.1%) > 施氮量 (24.5%) > 沸石修补 (9.9%)。

应用干湿交替灌溉显著提高水分生产率 (表 2)，较持续淹灌水分生产率提高 56.3% (表 3)。增施氮肥也显著提高 WP，但增至 N₁₀₅ 后水分生产率略有下降。主要原因是继续增施氮肥产量增加不明显，却显著提高了水稻地上生物量，加大了水分消耗。斜发沸石对水分生产率具有显著的影响，相对 Z₀ 处理，Z₅、Z₁₀ 和 Z₁₅ 分别提高 8.5%、23.9% 和 29.6%。不同灌溉模式下，沸石对 WP 的影响也有一定的区别。在持续淹灌下稻田增施斜发沸石 5~15 t/hm² 提高水分生产率 4.3%~20.1%；同时还发现，在干湿交替灌溉下增施斜发沸石增效更为明显，水分生产率可提高 12.9%~36.9% (表 4)。最高产处理 (I_{AWD}N₁₀₅Z₁₀)，可降低 27.8% 的水资源，提高水分生产率 52.5%。

表 4 灌溉和沸石交互对水分生产率的影响

Table 4 Effect of nitrogen and zeolite interaction on water productivity

灌溉模式 Irrigation model	沸石量 zeolite amendment rate/(t·hm ⁻²)			
	0	5	10	15
I _{Cf}	0.58f	0.61ef	0.68de	0.70d
I _{AWD}	0.83c	0.94b	1.08a	1.14a

注：表中不同处理间不同字母表示具有显著差异，相同字母表示没有差异。
Note: Different lowercase letters among treatments are significantly different at 0.05 probability level.

2.5 斜发沸石与不同水氮组合对氮肥农艺利用率 (NUE) 的影响

由表 2 可知，影响氮肥农艺利用效率因子众多，但只有施氮量 (N) 和斜发沸石 (Z) 以及 N×Z 交互效应的方差贡献率较大，具体表现为：施氮量 (44.5%) > 斜发沸石 (15.6%) > N×Z 交互 (7.8%)。可见，施氮量和沸石修补均是影响 NUE 的主控因子。

NUE 随着施氮量的增加而显著下降，特别在最高氮水平下 NUE 从 52.89 kg/kg (N_{52.5}) 降至 28.59 kg/kg (表 3)。与之相反，稻田增施斜发沸石显著提高 NUE，Z₅、Z₁₀ 和 Z₁₅ 分别提高 NUE 15.6%、29.4% 和 48.3%。N×Z 交互效应表明，NUE 在不同沸石水平下随着氮肥增加而显著下降，而在不同施氮水平下却随着沸石的增加而提高 (表 5)。可见，氮肥和沸石混施可抑制 NUE 的显著下降。如 N₁₀₅Z₁₀₋₁₅ 处理同 N_{157.5}Z₀ 相比，NUE 提高了 76.8%~87.0%，而不显著改变产量。可见，稻田施氮技术和沸石相结合具有减少稻田氮肥资源消耗、提高 NUE 和降低面源污染的巨大潜力。

表 5 氮肥和沸石交互对水稻农艺利用率的影响

Table 5 Effect of nitrogen and zeolite interaction on rice nitrogen use efficiency

施氮量 N application rate/(kg·hm ⁻²)	沸石量 Zeolite amendment rate/(t·hm ⁻²)			
	0	5	10	15
0	/	/	/	/
52.5	27.03c	33.68bc	37.65b	50.88a
105	21.70d	27.67c	35.02bc	36.61bc
157.5	18.99d	22.60d	25.25cd	24.22d

注：表中不同处理间不同字母表示具有显著差异，相同字母表示没有差异。
Note: Different lowercase letters among treatment are significantly different at 0.05 probability level.

2.6 斜发沸石与不同水氮组合对稻米蛋白质含量的影响

施氮量 (N) 和斜发沸石 (Z) 以及交互效应 Y×I×N 均显著影响着稻米蛋白质含量，三者方差贡献率均超过 2.5% (表 2)。增施氮肥显著提高稻米蛋白质含量，但在 0~105 kg/hm² 间增效不明显 (表 3)。而增施斜发沸石可显著提高稻米蛋白质含量。由表 3 可知，应用 5~15 t/hm² 斜发沸石可提升蛋白质含量 13.1%~26.4%。两年间稻米蛋白质含量对 I×N 交互的响应不一，可能同 2013 年高温阴雨天气偏多有关 (图 1)。

2.7 水稻植株地上部分总氮积累对水稻产量的影响

植株地上部分氮素积累和产量的对应关系，如图 5，表明水稻产量 (y) 与植株地上部分氮积累 (x) 呈极显著的三次多项式函数关系，具体表达式见图 5。多项式回归方程的决定系数 R²=0.741，表明地上部分总氮积累解释了 74.1% 的产量变化，即水稻产量变化主要由地上部分总氮积累来决定。从曲线变化趋势来看，尽管增长率在逐步下降，但水稻产量却随着地上部分总氮积累的增加而持续提高。而图 6 表明，在 0~10 t/hm² 范围内增施斜发沸石显著提高水稻植株地上部分总氮积累。由此可见，斜发沸石增产的潜在原因是斜发沸石显著提高了水稻植株地上部分总氮积累。

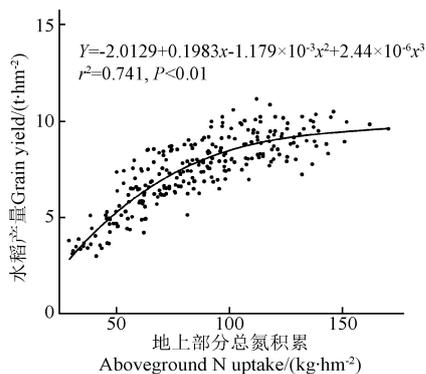


图 5 不同处理下水稻产量和水稻植株地上部分总氮积累对应关系

Fig.5 Grain yield for each treatment as a function of aboveground N accumulation of rice plant

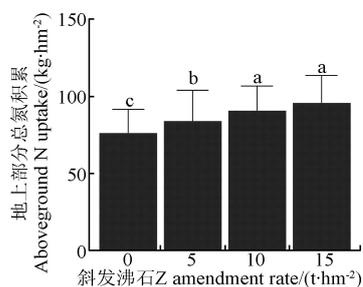


图 6 水稻植株地上部分总氮积累对不同沸石用量的响应

Fig.6 Aboveground N uptake in response to different rates of zeolite

3 讨论

3.1 斜发沸石对土壤持水性能和水分生产率的影响

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，硅铝氧四面体在平面上通过氧桥连接形成各种密封环，各种密封环再通过氧桥在三维空间相连接形成了极为丰富的一维、二维、三维的环和笼体系^[24-25]。这些网络体系构成了丰富的比表面积，可达 400~850 m²/g，这从物理意义上决定了沸石极强的吸水能力和持水能力^[26]。本研究表明，土壤基质势在 0~35 kPa 控水范围内，增施斜发沸石可提高土壤持水性能，改善稻田土壤水分状况，如基质势在 20 kPa 条件下，增施沸石 5~15 t/hm² 提高土壤体积含水量 3.0%~6.1%。这同前人研究基本一致，He 等^[27]结合实验室试验和大田试验发现，土壤沸石修补在极干旱的情况下能提高土壤含水量 0.4%~1.8%，一般情况下可提高 5%~15%。另外，沸石内部一般含有 10% 的水分，称为沸石水，在干燥条件下水分子很容易失去，而在适当的外界条件下，又可吸水恢复到初始的沸石水状态，且整个水化-脱水过程是可逆的、稳定的^[28-30]。这从化学角度揭示了斜发沸石改善稻田土壤水分状况的另一个原因。近年来，沸石用于稻田的相关研究也在相继展开。Sepaskhah 等^[21]在稻田进行的沸石和氮肥耦合研究结果表明，沸石还可以有效地降低稻田耗水量、提高水稻水分生产率。本研究也表明，在持续淹灌下稻田增施斜发沸石 5~15 t/hm² 提高水分生产率 4.3%~20.1%；同时还发现，在干湿交替

灌溉下增施斜发沸石增效更为明显，水分生产率可提高 12.9%~36.9%，可见，应用斜发沸石到干湿交替灌溉稻田中，可在干湿交替灌溉节水的基础上，进一步挖掘稻田节水潜力。

3.2 斜发沸石对土壤 CEC、氮肥农艺利用率和稻米蛋白质含量的影响

土壤 CEC 是指土壤胶体所能吸附各种阳离子的总量，它直接反映了土壤的保肥、供肥性能和缓冲能力的大小。斜发沸石具有极大的 CEC (100~300 cmol/kg)^[15-28]，其 CEC 是粘质稻田 3~12 倍^[19]。斜发沸石在农业应用中可显著提高土壤 CEC^[30-31]，降低氨挥发、氮素淋失，进而提高土壤有效氮^[15-16]。Ozbahce 等^[32]研究表明，土壤添加沸石能显著提高土壤阳离子交换能力，较之无沸石处理，干旱条件下可提高土壤 CEC 37.6%。本研究表明，不管在持续淹灌，还是干湿交替灌溉下，增施斜发沸石 (5~15 t/hm²) 均可显著提高稻田表层土壤 CEC (24.3%~81.9%)。表层土壤 CEC 的增加可显著提高氮肥回收率和利用率^[33]。本研究表明，稻田增施斜发沸石 5、10 和 15 t/hm² 分别提高 NUE 15.6%、29.4% 和 48.3%，尤其氮肥和斜发沸石混施，如 N₁₀₅Z₁₀₋₁₅，较之无沸石常规氮肥处理，可提高 NUE 76.8%~87.0% (表 5)，而不显著改变水稻产量 (图 3)。因为沸石极强的 CEC 和晶体内部丰富空隙物理结构极大地增强了稻田铵根离子吸附能力，吸收并缓慢释放氮肥，减少氮肥流失^[34-35]，从而显著提高营养物质 (NH₄⁺ 等) 的有效性和利用效率。

另外，增施斜发沸石对稻米营养品质有显著影响。本研究表明，在持续淹灌和干湿交替灌溉下稻田添加沸石对提高稻米蛋白质含量均有一定的正面影响，平均而言，增施沸石 5~15 t/hm² 可提高稻米蛋白质含量 13.1%~26.4%。

3.3 斜发沸石对水稻产量的影响

氮肥和水分是作物生长两个最重要的可控因素，它们交互影响着水稻的生长发育和产量的形成^[36]。本研究通过灌溉模式、施氮量和斜发沸石综合试验表明，斜发沸石贡献了 6.3% 的水稻产量方差变化，其贡献率低于氮肥 (65.3%)，但高于灌溉模式 (4.8%) 和 I×N 交互 (4.2%)，这表明斜发沸石也是影响水稻产量表现的另一个重要因素^[18]。较之无沸石处理，稻田增施斜发沸石 (5~15 t/hm²) 提高产量 4.7%~16.8%。本研究还发现，将斜发沸石应用于稻田水肥耦合研究中，可避免在高氮水平下干湿交替灌溉的水稻产量低于持续淹灌的现象，当稻田增施沸石达 10 t/hm² 后，尤其在 15 t/hm² 水平下，干湿交替灌溉在所有氮肥水平下其增产效果均优于持续淹灌。这表明，将斜发沸石应用于稻田水肥耦合研究中，可充分激发水肥耦合的激励机制和协同作用，降低干湿交替灌溉的不利影响。其原因可能有：1) 斜发沸石内部丰富的比表面积以及沸石水，提高了土壤持水性能，改善了稻田土壤水分状况，为作物生长提供充足的水分，尤其在控水时期，降低干旱胁迫对产量的负面影响^[27]；2) 沸石极强的阳离子交换能力，提高了稻田保肥能力，从而提高稻田氮肥有效性，为作物生长提供较好的营养条件^[33-35]。图 5

和图 6 更进一步揭示,斜发沸石增产效应是因为斜发沸石显著提高水稻植株地上部分氮积累。

本研究还表明,最高的水稻产量和水分利用率均在 I_{AWD}N₁₀₅Z₁₀ 处理下获得,较之持续淹灌常规施氮处理 (I_{CF}N_{157.5}Z₀),该处理可减少灌溉用水 27.8%和施氮 33.3%,增产 10.6%、提高蛋白质含量 10.1%、氮肥农艺利用效率 89.2%和水分利用率 52.5%。

3.4 基于斜发沸石的水肥耦合效应的多重正效应的长效性

大量的研究表明,稻田斜发沸石应用不仅具有以上诸多正效应,还具有一次施用多年受益的长效性^[20-21]。通过方差分析发现,在 6 个响应变量 8 项年和年相关的交互因子中,97.9%(47/48)因子均没有显著影响(表 2),表明两年间斜发沸石对土壤 CEC、水稻产量、水分生产率和氮肥利用率对灌溉模式、施氮量以及二者交互的响应的影响均没有显著性差异。由此可见,2013 年稻田虽然没有施加沸石,但沸石增产和节水节肥的正效应依然存在。这同 Andronikashvilf 等^[18]研究结论一致。Grigora^[37]也通过长期旱地试验表明,大田添加 15 t/hm²的沸石可提高土壤营养物质吸收能力 15%~20%,并可持续 7~20 a。由此可见,不管持续淹灌还是干湿交替灌溉,稻田斜发沸石应用(尤其同 105 kg/hm²氮肥混施)不仅具有节水、节肥、增产的正效应,还具有较强后效性(至少可持续 2 a),但在稻田实践中其具体的施用周期,特别是在干湿交替灌溉下,仍需经过长期试验进一步确定。

4 结论

本文采用离心机法研究斜发沸石对土壤持水性能的影响,并运用蒸渗仪进行灌溉-氮肥-斜发沸石综合试验,研究了干湿交替灌溉下水氮耦合对沸石处理稻田的产量和水氮利用的影响。主要结论如下:

1) 增施斜发沸石可明显提高土壤持水性能,改善土壤水分状况,在持续淹灌和干湿交替灌溉条件下均能提高水稻水分生产率,且后者更为明显。

2) 稻田增施斜发沸石可显著提高土壤阳离子交换量,显著提高氮肥利用率,尤其 10~15 t/hm²的斜发沸石同 105 kg/hm²的氮肥混施可显著提高氮肥农艺利用率和稻米蛋白质含量;

3) 稻田增施斜发沸石可使水稻增产 4.7%~16.8%,因为斜发沸石提高稻田土壤持水能力和阳离子交换量,显著改善了稻田土壤水分状况和营养条件;

4) 增施斜发沸石可优化水肥耦合,避免在高氮水平下干湿交替灌溉增产效果低于持续淹灌的现象。与常规处理相比,干湿交替灌溉稻田施用 10 t/hm²斜发沸石和 105 kg/hm²的氮肥,可降低 27.8%的水资源和 33.3%氮肥资源消耗,并实现 10.6%的增产,进而显著提高氮肥利用效率和水分生产率,且这些正效应至少可持续 2 a。

【参 考 文 献】

- [1] Tatalovic M. Irrigation reform needed in Asia[J]. Nature, 2009.doi:10.1038/news.2009.826.
- [2] McLean J L, Dawe D C, Hardy B, et al. Rice almanac[M]. Los Banos: International Rice Research Institute, 2002.
- [3] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global level[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2009.
- [4] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global Level[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2013.
- [5] Consuelo M P, Bienvenido J, Samuel P L, et al. Effect of late nitrogen fertilizer application on head rice yield protein content, and grain quality of rice[J]. Cereal Chemistry, 1996, 73(5): 556—560.
- [6] Spiertz J H J. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(1): 43—55.
- [7] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095—1103. Peng Shaobing, Huang Jianliang, Zhong Xuhua, et al. Research strategy in improving fertilizer -nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095—1103. (in Chinese with English abstract)
- [8] 肖梦华, 俞双恩, 丁继辉. 控制排水条件下稻田水氮磷流失环境效应的研究[C]//土肥水资源高效利用与农业面源污染防治技术研讨会, 中国合肥, 2011. Xiao Menghua, Yu Shuang'en, Ding Jihui. The paddy water environmental effect on nitrogen and phosphorus loss on the condition of controlled drainage[C]//Efficient utilization of soil, fertilizer and water resources and agricultural non-point source pollution prevention and Control Technology Seminar, Hefei, China, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [9] Dong N M, Brandt K K., Sørensen J, et al. Effects of alternating wetting and drying versus continuous flooding on fertilizer nitrogen fate in rice fields in the Mekong Delta, Vietnam[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 47(2): 166—174.
- [10] Ye Y, Liang X, Chen Y, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. Field Crops Research, 2013, 144(6): 212—224.
- [11] Tan Xuezhi, Shao Dongguo, Gu Wenquan, et al. Field analysis of water and nitrogen fate in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D[J]. Agricultural Water Management, 2015, 150: 67—80.
- [12] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6): 777—787.
- [13] Kithome M, Paul J W, Lavkulich L M, et al. Kinetics of ammonium adsorption and desorption by the natural zeolite clinoptilolite[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(3): 622.
- [14] Piñón-Villarreal A R, Bawazir A S, Shukla M K, et al. Retention and transport of nitrate and ammonium in loamy sand amended with clinoptilolite zeolite[J]. Journal of Irrigation

- and Drainage Engineering, 2013, 139(9): 755—765.
- [15] Ahmed O H, Yap C H B, Muhamad A M N. Minimizing ammonia loss from urea through mixing with zeolite and acid sulphate soil[J]. International Journal of the Physical Sciences, 2010, 5(14): 2198—2202.
- [16] Omar O L, Ahmed O H, Muhamad A M N. Minimizing ammonia volatilization in waterlogged soils through mixing of urea with zeolite and sago waste water[J]. International Journal of Physical Sciences, 2010, 5(14): 2193—2197.
- [17] 化全县, 李见云, 周健民. 天然沸石对磷、钾在红壤中迁移影响的室内模拟研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 261—263.
Hua Quanxian, Li Jianyun, Zhou Jianmin. Laboratory simulation of effects of native clinoptilolite on phosphorus and potassium mobilization in red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 261—263. (in Chinese with English abstract)
- [18] Andronikashvili T G, Urushadze T F, Eprikashvili L G, et al. Use of natural zeolites in plant growing-transition to biological agriculture[J]. Bulletin of the Georgian national academy of sciences, 2007, 175(4): 112—117.
- [19] Ando H, Mihara C, Kakuda K, et al. The fate of ammonium nitrogen applied to flooded rice as affected by zeolite addition[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1996, 42(3): 531—538.
- [20] Kavooosi M. Effects of zeolite application on rice yield, nitrogen recovery, and nitrogen use efficiency[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(1): 69—76.
- [21] 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.
- [22] Chen Taotao, Wilson L T, Chi Daocai. Zeolite - amendment can improve nitrogen and water use efficiency[J]. Texas Rice Special Section, 2015, 15(1): 13—15.
- [23] 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1181—1188.
Xing Xuguang, Zhao Wengang, Ma Xiaoyi, et al. Study on soil shrinkage characteristics during soil water characteristic curve measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1181—1188. (in Chinese with English abstract)
- [24] Bernardi A C D C, Mota E P D, Souza S D C H, et al. Ammonia volatilization, dry matter yield and nitrogen levels of Italian ryegrass fertilized with urea and zeolite[C]. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world. Brisbane, Australia, 2010.
- [25] Wang Xiaoling, Qiao Bin, Li Songmin, et al. Using natural Chinese zeolite to remove ammonium from rainfall runoff following urea fertilization of a paddy rice field[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 23: 1—10.
- [26] Shi Weiyu, Shao Hongbo, Lihua, et al. Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(1): 1—6.
- [27] He Xiubin, Huang Zhanbin. Zeolite application for enhancing water infiltration and retention in loess soil[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 34(1): 45—52.
- [28] Leggo P J, Ledésert B, Christie G. The role of clinoptilolite in organo-zeolitic-soil systems used for phytoremediation[J]. Science of the Total Environment, 2006, 363(1/2/3): 1—10.
- [29] Ramesh K, Reddy D D, Biswas A K, et al. Zeolites and their potential uses in agriculture[J]. Advances in Agronomy, 2011, 113(4): 215—236.
- [30] 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(1): 193—202.
- [31] Ippolito J A, Tarkalson D D, Lehrsch G A. Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth[J]. Soil Science, 2011, 176(3): 136—142.
- [32] Ozbahce A, Tari A F, Gönülal E, et al. The effect of zeolite applications on yield components and nutrient uptake of common bean under water stress[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 61(5): 615—626.
- [33] 葛顺峰, 彭玲, 任怡华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 366—373.
Ge Shunfeng, Peng Ling, Ren Yihua, et al. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 366—373. (in Chinese with English abstract)
- [34] He Z L, Calvert D V, Alva A K, et al. Clinoptilolite zeolite and cellulose amendments to reduce ammonia volatilization in a calcareous sandy soil[J]. Plant and Soil, 2002, 247(2): 253—260.
- [35] Osumanu H A, Aminuddin H, Ahmad H M H. Ammonia volatilization and ammonium accumulation from urea mixed with zeolite and triple superphosphate[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science, 2008, 58(2): 182—186.
- [36] Liu Lijun, Chen Tingting, Wang Zhiqin, et al. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice[J]. Field Crops Research, 2013, 154(3): 226—235.
- [37] Grigora T I. Action and after effect of zeolite-clinoptilolite on fertility of sod-podzolic soil[J]. Agronomy for Sustainable Development, 1985, 60(3): 31—35.

Impact of water-nitrogen coupling on grain yield, water and nitrogen usage in zeolite-amended paddy field under alternate wetting and drying irrigation

Chen Taotao¹, Sun Dehuan², Zhang Xudong¹, Wu Qi¹, Zheng Junlin¹, Chi Daocai^{1*}

(1. College of Water Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Donggang Experimental Station of New Irrigation Technology, Donggang 118300, China)

Abstract: Increasing demand for maintaining yield with reducing environmental and resource costs challenges conventional rice production. Water inputs can be reduced by the use of alternate wetting and drying (AWD) irrigation. And clinoptilolite zeolite (CZ) benefits farmers through decreasing water inputs and N usages in non-irrigated farmland, however, its performance is rarely reported in paddy field, especially under AWD irrigation. In order to clarify the application potential of CZ under AWD irrigation, an experiment was conducted under automatic canopy lysimeters to determine the effects of CZ on rice grain yield and water and nitrogen usage efficiency under different nitrogen application rates and irrigation regimes using the split-split-split plot design. The experimental site was located at the Donggang Experimental Station of New Irrigation Technology, Dandong, China in 2012 and 2013. A japonica rice, *Oryza sativa* L. cv. Gangyu 6 was cultivated on a silty loam soil. Years after zeolite application were main plots. Two irrigation regimes, continuous flooding and AWD irrigations, were subplots. N application rates (0, 52.5, 105 and 157.5 kg/hm² N applied as urea) were sub-subplots and CZ application rates (0, 5, 10 and 15 t/hm² CZ) were sub-sub-sub plots. The experiment was repeated in 2013 but no additional CZ was received, and the plots in 2013 experiment were same as 2012 experiment. Dynamics of soil moisture characteristic curves under different rates of zeolite application were also observed through mixing surface soil samples attained from the experimental site with 0, 5, 10 and 15 t/hm² in the laboratory. Results indicated that paddy field amended with increasing rates of CZ application significantly increased soil water holding capacity, and improved paddy soil moisture status, when the soil moisture status of paddy surface soil was controlled within the range of -35-0 kPa. At the soil matrix potential of -20 kPa, soil application of 5-15 t/hm² rates of CZ resulted in 3.0%-6.1% higher volumetric soil water content than zero CZ treatment. The increasing of soil water holding capacity resulted in enhanced water productivity in both continuous flooding and AWD irrigations, while the latter was more obvious. Increasing rate of CZ application significantly improved soil cation exchange capacity and nutrient preserving capability, In particular, the application rate of 105 kg/hm² nitrogen fertilizer application mixed with 10-15 t/hm² CZ could significantly improve nitrogen utilization efficiency by 76.8%-87.0% while maintaining normal rice yield. Increasing CZ application also increased grain yield by 4.7%-16.8%, and overcome a slight reduction in grain yield under AWD irrigations at the highest nitrogen rate, as compared to continuous flooding irrigation with the same nitrogen rate. In general, AWD irrigation in combination with 10 t/hm² CZ and 105 kg/hm² nitrogen fertilizer application was recommended. This rice production system could benefit farmers through reducing 27.8% irrigation water, 33.3% nitrogen application, while increasing 10.6% rice yield, 89.2% nitrogen use efficiency and 52.5% water productivity and these positive effects could last at least 2 years. The proposed production system was also expected to be an available strategy for ecological agriculture for arid and semi-arid area which maintains yield with lower environmental and resource costs by enhancing soil water holding capacity and improving nutrient preserving capability in paddy field due to CZ application.

Keywords: zeolite; nitrogen; irrigation; rice; alternate wetting and drying; water productivity; cation exchange capacity; soil water holding capacity