

## 水稻品种和砷污染对土壤溶解性有机碳氮的影响\*

类成霞<sup>1,3</sup> 陈长青<sup>1,3†</sup> 蒋瑀霁<sup>2,3</sup> 孙波<sup>2,3</sup>

(1 南京农业大学应用生态研究所, 南京 210095)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 国家红壤改良工程技术研究中心, 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

**摘要** 选取有机质含量和 pH 不同的 2 种水稻土(黄泥田和红泥田), 通过盆栽实验研究 As 污染条件下, 种植 9 个水稻品种对土壤溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)含量的影响, 分析品种、污染和土壤类型的交互作用和相对影响。结果表明, 水稻品种显著影响了土壤 DOC 和 DON 的变化, 在水稻收获后, DOC 平均含量的大小顺序为杂交稻( $41.09 \pm 0.92 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > 籼稻( $38.10 \pm 1.53 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > 粳稻( $37.74 \pm 1.37 \text{ mg kg}^{-1}$ ); DON 平均含量的大小顺序为粳稻( $2.94 \pm 0.40 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > 杂交稻( $2.61 \pm 0.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > 籼稻( $1.45 \pm 0.17 \text{ mg kg}^{-1}$ )。As 污染降低了土壤 DOC 和 DON 的含量, 但不同品种水稻的响应不同。与对照相比, As 污染条件下, 黄泥田和红泥田中 DOC 平均含量分别下降了 14.4% 和 11.1%, DON 平均含量分别下降了 65.0% 和 44.7%; DOC 在种植杂交稻后降幅最小, 而 DON 在种植籼稻后降幅最小。在两种水稻土中, 黄泥田的 DOC 和 DON 平均含量高于红泥田, 在没有 As 污染条件下, 分别高 22.4% 和 45.8%, 这与黄泥田有机质含量和 pH 高有关。水稻品种、As 污染和土壤类型对 DOC 和 DON 变化的影响不同, 3 个因子对 DOC 变化的相对贡献率分别为 7.7%、15.5% 和 27.6%, 对 DON 变化的相对贡献率分别为 14.7%、24.2% 和 2.0%。

**关键词** 溶解性有机碳; 溶解性有机氮; 水稻品种; 黄泥田; 红泥田; 砷污染

**中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)是土壤有机质中最活跃的组分, 影响土壤中物质的分解、溶解、吸附、解吸、吸收、迁移和生物毒性等过程。土壤性质(温度、含水量、pH、CEC 等)<sup>[1-3]</sup>、土地利用类型<sup>[4-7]</sup>、施肥灌溉<sup>[8-9]</sup>、耕作制度<sup>[10]</sup>、大气 CO<sub>2</sub> 升高和氮沉降<sup>[11]</sup> 等环境因子和管理措施均可影响土壤 DOC 和 DON 的动态变化。

在不同利用方式下, 土壤 DOC 平均含量的一般顺序为: 林地 > 草地 > 农田<sup>[12]</sup>。由于不同植被的凋落物及根系分泌物向土壤归还的物质成分和数量不同, 植被类型也是影响 DOC、DON 的重要因素<sup>[13]</sup>。Khalid 等<sup>[14]</sup> 研究发现, 种植牧草加快了土壤 DOC、DON 的转化速率, 但 11 种牧草间土壤 DOC、DON 含量差异并不显著。姜培坤<sup>[15]</sup> 研究不同森林植被的土壤活性有机碳库, 发现常绿阔叶林的土壤 DOC 含量高于马尾松和杉木林。在农田生态

系统中, 针对作物轮作和作物品种对土壤 DOC、DON 的影响研究较少<sup>[13]</sup>, 而这在调控农田养分循环中具有重要意义。

近年来, 由于采矿、冶金、造纸、化工等“工业三废”的排放以及农药的大量使用, 一些地区的水稻田已受到不同程度的 As 污染<sup>[16-18]</sup>, 威胁了水稻的清洁生产。研究表明, 植物受重金属胁迫时会改变分泌物的组成和数量<sup>[19]</sup>, 增加土壤中具有活性基团(如: COO<sup>-</sup>、-OH、-NH、=NH、-S<sup>-</sup>、-O<sup>-</sup> 等)的有机物质及黏胶物质, 作为有机配位体与重金属元素络合或螯合, 降低其生物有效性<sup>[20]</sup>, 这一过程同时会影响土壤 DOC、DON 的变化。Kwon-Rae 等<sup>[21]</sup> 的研究结果表明, 受重金属污染的两种酸性土壤(pH 分别为 6.2、6.4)、碱性土壤(pH 分别为 8.2、9.2)分别种植芥菜和向日葵均较不种任何植物的土壤 DOC 浓度高, 因此 DOC 含量的增加主要

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2011CB100506)、国家科技支撑计划(2011BAD41B01)和农业部公益性行业科研专项(200903015)资助

† 通讯作者, E-mail: c0828@126.com

作者简介: 类成霞(1986—), 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: y-rainy@163.com

收稿日期: 2012-03-28; 收到修改稿日期: 2012-07-04

是由根系分泌物引起的,且深度污染的碱性土壤较中度污染的酸性土壤增加幅度更大,说明根系分泌物的数量受 pH 和重金属污染的影响。在受到重金属污染的水稻土中,污染抑制了微生物数量及其活性,降低了 DOC 的矿化,从而提高重金属的有效性,进一步抑制微生物对有机碳的矿化<sup>[22]</sup>。由于不同区域受重金属污染的土壤类型多样,同时种植的作物品种也不同,因此了解作物品种、重金属污染与土壤类型对 DOC、DON 的交互影响及其相对贡献率,可以为揭示重金属污染对土壤养分循环的效应,评价适合重金属污染土壤种植的抗性品种提供理论基础。本文针对长江流域两种典型的水稻土(江苏的黄泥田和江西的红泥田),通过温室盆栽实验,模拟研究 As 污染胁迫下,种植不同的杂交稻、粳稻、籼稻品种对土壤 DOC、DON 的影响,以期为评价水稻品种对 As 污染的影响、制定 As 污染水稻土的利用对策提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试的 2 种水稻土采自江苏常熟和江西鹰潭,分别为太湖流域湖积物母质发育的黄泥田(Y)和第四纪红色黏土母质发育的红泥田(R)。土样去除残根、石块,自然风干,磨碎后过 2 mm 筛备用。其基本的理化性质见表 1。

供试水稻品种为长江中下游以及东南沿海区广泛种植的 3 个亚种共 9 个品种,包括 3 个杂交稻品种:德农 2000(DN)、天协 6 号(TX)、冈优 118(GY),3 个粳稻品种:晚粳 9707(WJ)、宁粳 1 号(NiJ)、南粳 32(NaJ),3 个籼稻品种:中育 1 号(ZY)、特三矮 2 号(TSA)、浙 1500(Zhe)。这些水稻品种的生育期在 130~158 d 之间。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested soils

土壤类型 Soil type	pH	氧化还原电位 Eh (mV)	阳离子交换量 CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )
黄泥田 Yellow paddy soil	6.15	793	17.98	46.06	1.31
红泥田 Red paddy soil	5.07	791	9.39	20.75	1.86
土壤类型 Soil type	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g kg <sup>-1</sup> )	全铁 Total Fe (g kg <sup>-1</sup> )	全铝 Total Al (g kg <sup>-1</sup> )	全砷 Total As (mg kg <sup>-1</sup> )
黄泥田 Yellow paddy soil	0.51	15.81	29.64	67.81	9.04
红泥田 Red paddy soil	0.53	8.88	12.95	41.10	4.29

### 1.2 试验设计及项目测定

试验针对 2 种水稻土设置对照(不加 As)和 45 mg kg<sup>-1</sup> As 污染处理(国家二级土壤环境质量的 1.5 倍)。As 污染处理方法是:称取 7 kg 风干土壤置于外径 36 cm、高 30 cm 的塑料盆钵中,按二级土壤环境质量标准(30 mg kg<sup>-1</sup>)的 1.5 倍加入 Na<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>溶液,保持 80% 的田间持水量平衡 3 个月备用。试验共有 4 个处理:黄泥田对照(YCK)、黄泥田加 As 处理(YAs)、红泥田对照(RCK)、红泥田加 As 处理(RAs)。

精选供试水稻的饱满种子,于苗床育秧后,移栽至预培养的淹水土样中每盆 3 穴,每穴 3 株,每种

水稻重复 3 盆。移栽前一个月施入尿素、Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>作底肥,施用量分别为 0.15 g kg<sup>-1</sup>、0.04 g kg<sup>-1</sup>、0.10 g kg<sup>-1</sup>,并于分蘖期施追施尿素 0.075 g kg<sup>-1</sup>。移栽后全生育期保持盆钵土面上 2~3 cm 水层。水稻收获后测定根系生物量和籽粒产量,并取土样测定土壤 pH、有效砷及 DOC、DON 含量。土壤 pH 采用电位法测定(1.0 mol L<sup>-1</sup>的 KCl 浸提,水土比 2.5:1);土壤有效砷的含量按水土比 10:1 用 0.5 mol L<sup>-1</sup>的 NaHCO<sub>3</sub>震荡浸提后,用双道原子荧光光度计(AFS-230E,北京科创海光仪器有限公司)测定;DOC、DON 的提取及测定参考 Jones 和 Willett<sup>[23]</sup>的方法,用岛津 TOC-5050A 总有机碳仪

测定滤液中的 DOC 和总氮(TN),用 AA3 连续流动分析仪测定无机氮(IN,主要包括  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N),TN 和 IN 含量之差即为 DON 的含量,即:  $\text{DON} = \text{TN} - \text{IN}$ 。

### 1.3 统计分析

所有数据采用 SPSS 13.0 进行统计分析,其中,多重比较分析采用 Duncan 新复极差法,并根据各因素及交互作用的方差除以总方差确定其相对贡献率。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤溶解性有机碳的变化

2 种水稻土种植不同品种水稻后,土壤 DOC 的变化范围为 21.74 ~ 54.88  $\text{mg kg}^{-1}$ ,平均值为 38.98  $\text{mg kg}^{-1}$ 。总体上,种植杂交稻后 DOC 含量最高(41.09 ± 0.92  $\text{mg kg}^{-1}$ ),籼稻(38.10 ±

1.53  $\text{mg kg}^{-1}$ )和粳稻(37.74 ± 1.37  $\text{mg kg}^{-1}$ )稍低。9 个水稻品种的土壤 DOC 平均含量的大小顺序为:GY(41.52  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > TX(40.97  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > DN(40.79  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > TSA(40.12  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > WJ(39.26  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > Zhe(38.11  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > NiJ(37.23  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > NaJ(36.75  $\text{mg kg}^{-1}$ ) > ZY(36.07  $\text{mg kg}^{-1}$ )。

品种对土壤 DOC 含量的影响在不同土壤和 As 污染下有所不同(表 2)。在无 As 污染的黄泥田(YCK)中,9 种水稻对土壤 DOC 无显著影响,但杂交稻、粳稻、籼稻三个品系相比,籼稻、粳稻的土壤 DOC 平均含量略高于杂交稻,平均含量分别为 48.04、46.73、42.81  $\text{mg kg}^{-1}$ 。在无 As 污染的红泥田(RCK)中,水稻品种对土壤 DOC 有显著影响,杂交稻(39.92  $\text{mg kg}^{-1}$ )和粳稻(37.79  $\text{mg kg}^{-1}$ )显著高于籼稻(34.70  $\text{mg kg}^{-1}$ ),以 DN、TX 含量最高, NiJ 最低。

表 2 不同水稻品种、土壤类型和 As 处理对土壤 DOC 含量的影响

Table 2 Soil DOC contents as affected by rice cultivar, soil type and As treatments ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

品种 Cultivar		黄泥田 Yellow paddy soil		红泥田 Red paddy soil	
		YCK	YAs	RCK	RAs
杂交稻 Hybrid rice	DN	43.49 ± 1.67aA	41.51 ± 1.90abC	36.72 ± 1.14bcBC	41.45 ± 1.04bcB
	TX	41.30 ± 4.15aA	42.87 ± 1.56aB	38.37 ± 0.89abcB	41.33 ± 1.89abB
粳稻 Japonica rice	GY	43.64 ± 5.63aA	42.94 ± 2.81aB	44.68 ± 3.59aB	34.80 ± 0.46cdB
	WJ	47.12 ± 3.73aA	40.34 ± 0.73abC	41.52 ± 3.73abB	28.04 ± 1.53aBC
籼稻 Indica rice	NiJ	47.64 ± 1.79aA	38.37 ± 1.40abB	37.49 ± 2.91abcA	25.41 ± 2.07aAB
	NaJ	45.42 ± 3.73aA	34.99 ± 3.31bA	34.36 ± 2.75bcA	32.21 ± 2.42bcB
	ZY	46.15 ± 2.16aAB	35.16 ± 2.98bAB	33.64 ± 0.59bcA	29.34 ± 1.04deB
	TSA	47.31 ± 1.51aA	40.02 ± 0.51abA	37.88 ± 1.42abcA	35.25 ± 3.49eA
	Zhe	50.67 ± 0.58aC	37.19 ± 1.33abAB	32.59 ± 1.92cA	32.00 ± 3.24cdBC

注:表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误;采用 Duncan 多重比较进行差异显著性检验,同列数值后不同小写字母代表同一土壤和 As 处理、不同水稻品种间差异显著( $p < 0.05$ );同行数值后不同大写字母代表同一水稻品种、不同土壤和 As 处理间差异显著( $p < 0.05$ ),下同 Note: The data in table are the mean values ± standard error of 3 replications. A test of significance was examined by Duncan's multiple comparison. Values in the same column followed by different lowercase letter indicate significant differences at  $p < 0.05$  between treatments of rice cultivars under the same soil and As treatment. Values in the same line followed by different uppercase letter indicate significant differences at  $p < 0.05$  between different soil and As treatments with the same rice cultivar. The same below

在 As 污染条件下,水稻品种均显著影响了土壤 DOC 的变化。黄泥田(YAs)中,杂交稻(42.72  $\text{mg kg}^{-1}$ )显著高于籼稻(37.75  $\text{mg kg}^{-1}$ )和粳稻(36.92  $\text{mg kg}^{-1}$ ),其中以 TX、GY 品种的 DOC 含量最高,NaJ、ZY 最低,其他品种相差不大。红泥田(RAs)中,杂交稻(38.43  $\text{mg kg}^{-1}$ )显著高于籼稻(31.01  $\text{mg kg}^{-1}$ )和粳稻(27.86  $\text{mg kg}^{-1}$ ),其

中以 DN、TX 含量最高,WJ、NiJ、ZY 最低,其他品种相差不大。

两种水稻土相比,黄泥田 DOC 平均含量高于红泥田。在没有 As 污染条件下,黄泥田 DOC 平均含量(45.86  $\text{mg kg}^{-1}$ )较红泥田(37.47  $\text{mg kg}^{-1}$ )高 22.4%;在 As 污染条件下,黄泥田 DOC 平均含量(39.27  $\text{mg kg}^{-1}$ )较红泥田(33.32  $\text{mg kg}^{-1}$ )高 17.9%。

As 污染总体上减少了土壤 DOC 的含量,DOC 平均含量在黄泥田和红泥田中分别下降了 14.4% 和 11.1%。As 污染对种植不同品种的土壤 DOC 的影响不同,种植杂交稻 DOC 变化较小,平均含量下降了 7.20%;而种植粳稻和籼稻品种后,DOC 含量明显下降,其平均含量分别下降了 22.9% 和 12.4%,说明不同品种对 As 的耐受性不同。

## 2.2 土壤溶解性有机氮的变化

2 种水稻土种植不同品种水稻后,土壤 DON

的变化范围为 0.24 ~ 9.34 mg kg<sup>-1</sup>,平均值为 2.33 mg kg<sup>-1</sup>。与 DOC 不同,总体上,种植粳稻的 DON 含量最高(2.94 ± 0.40 mg kg<sup>-1</sup>),杂交稻次之(2.61 ± 0.42 mg kg<sup>-1</sup>),籼稻最低(1.45 ± 0.17 mg kg<sup>-1</sup>)。9 个水稻品种的 DON 平均含量大小顺序为: NiJ(3.36 mg kg<sup>-1</sup>) > GY(3.11 mg kg<sup>-1</sup>) > WJ(2.92 mg kg<sup>-1</sup>) > NaJ(2.54 mg kg<sup>-1</sup>) > TX(2.53 mg kg<sup>-1</sup>) > DN(2.20 mg kg<sup>-1</sup>) > ZY(1.89 mg kg<sup>-1</sup>) > Zhe(1.33 mg kg<sup>-1</sup>) > TSA(1.13 mg kg<sup>-1</sup>)。

表 3 不同水稻品种、土壤类型和 As 处理对土壤 DON 含量的影响

Table 3 Soil DON contents as affected by rice cultivar, soil type and As treatments (mg kg<sup>-1</sup>)

品种 Cultivar		黄泥田 Yellow paddy soil		红泥田 Red paddy soil	
		YCK	YAs	RCK	RAs
杂交稻 Hybrid rice	DN	3.96 ± 0.53bcdA	0.95 ± 0.44cC	1.52 ± 0.27cdBC	2.37 ± 0.34abB
	TX	6.04 ± 1.70abA	0.77 ± 0.05cB	1.69 ± 0.21cdB	1.61 ± 0.11abcB
粳稻 Japonica rice	GY	7.01 ± 1.14aA	1.12 ± 0.15bcB	2.83 ± 0.49bcdB	1.49 ± 0.06abcB
	WJ	6.70 ± 0.86aA	0.83 ± 0.34cC	2.65 ± 0.24bcdB	1.53 ± 0.21abcBC
	NiJ	4.72 ± 0.46abcA	0.92 ± 0.24cB	5.21 ± 1.27aA	2.59 ± 0.85aAB
籼稻 Indica rice	NaJ	3.13 ± 0.45cdeA	2.49 ± 0.38aA	4.00 ± 0.90abA	0.54 ± 0.14cB
	ZY	1.79 ± 0.50deAB	1.98 ± 0.33abAB	3.20 ± 0.92bcA	0.57 ± 0.17cB
	TSA	0.73 ± 0.20eA	1.55 ± 0.36abcA	0.96 ± 0.03dA	1.33 ± 0.34bcA
	Zhe	0.72 ± 0.06eC	1.58 ± 0.22abcAB	1.82 ± 0.15cdA	1.18 ± 0.09cBC

与 DOC 相比,品种对土壤 DON 含量的影响在不同土壤和 As 污染下更为显著(表 3)。在无 As 污染下,黄泥田中(YCK),种植杂交稻(5.67 mg kg<sup>-1</sup>)和粳稻(4.85 mg kg<sup>-1</sup>)的 DON 明显高于籼稻(1.08 mg kg<sup>-1</sup>),其中以 GY 和 WJ 的 DON 含量最高,TSA、Zhe 最低。在红泥田(RCK)中,种植粳稻(3.95 mg kg<sup>-1</sup>)的 DON 显著高于杂交稻(2.01 mg kg<sup>-1</sup>)和籼稻(1.99 mg kg<sup>-1</sup>),其中 NiJ 的含量最高,TSA 最低。

在 As 污染条件下,黄泥田(YAs)中,籼稻(1.70 mg kg<sup>-1</sup>)和粳稻(1.41 mg kg<sup>-1</sup>)的 DON 高于杂交稻(0.95 mg kg<sup>-1</sup>),其中 NaJ、ZY、TSA、Zhe 的 DON 含量高于 DN、TX、GY、WJ、NiJ。红泥田(RAs)中,种植杂交稻(1.82 mg kg<sup>-1</sup>)和粳稻(1.55 mg kg<sup>-1</sup>)的 DON 显著高于籼稻(1.02 mg kg<sup>-1</sup>),其中 DN、TX、GY、WJ、NiJ 的含量高于 NaJ、ZY、TSA、Zhe。

两种水稻土相比,在没有 As 污染条件下,黄

泥田 DON 平均含量(3.87 mg kg<sup>-1</sup>)较红泥田(2.65 mg kg<sup>-1</sup>)高 45.8%。但在 As 污染条件下,黄泥田和红泥田土壤中 DON 平均含量差异不显著,分别为 1.35 mg kg<sup>-1</sup>和 1.47 mg kg<sup>-1</sup>。

As 污染总体上显著降低了土壤 DON 的含量(表 3),DON 平均含量在黄泥田和红泥田中分别下降了 65.0% 和 44.7%。但不同品种的下降幅度不同,种植杂交稻、粳稻、籼稻后,DON 平均含量分别下降了 68.1%、65.6% 和 7.0%。

## 2.3 影响土壤溶解性有机碳氮含量的环境因素

线性相关分析表明(表 4),黄泥田种植水稻后土壤 DOC 和 DON 与水稻根生物量和土壤 pH 呈显著( $p < 0.05$ )正相关,与土壤有效砷含量呈显著负相关。红泥田中种植水稻后土壤 DOC 和 DON 与土壤有效砷含量均呈显著负相关,同时土壤 DOC 含量还与土壤 pH 呈显著正相关,红泥田的 DOC 和 DON 与土壤水稻根生物量相关不显著。

表 4 土壤溶解性有机碳氮含量与环境因素的相关性  
Table 4 Correlation between DOC or DON and environmental factors

因子 Factor	黄泥田 Yellow paddy soil		红泥田 Red paddy soil	
	DOC	DON	DOC	DON
土壤 pH Soil pH	0.376 **	0.554 **	0.436 **	0.25
有效砷 Available As	-0.612 **	-0.529 **	-0.354 **	-0.418 **
根系生物量 Root biomass	0.268 *	0.662 **	0.25	0.04

\*\* :  $p < 0.01$ ; \* :  $p < 0.05$

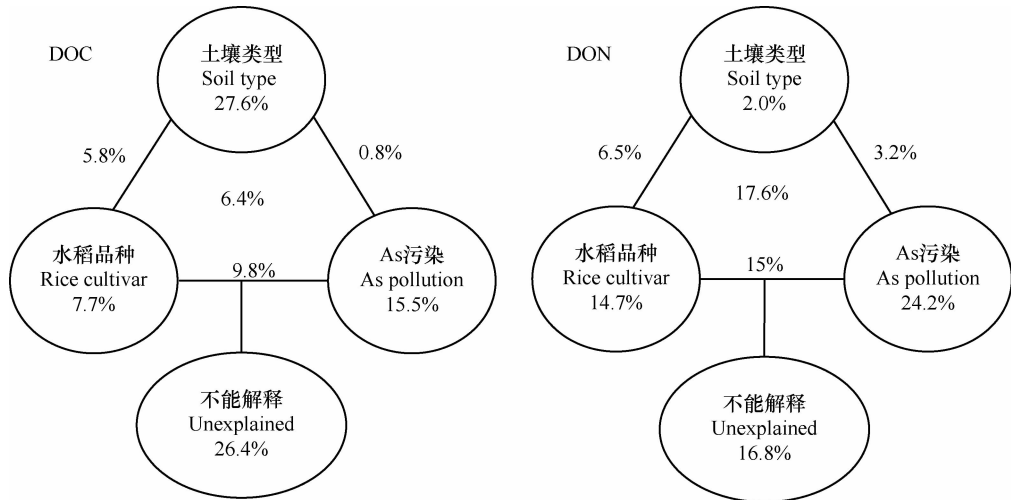


图 1 土壤类型、As 污染、水稻品种对 DOC、DON 变化的相对贡献率

Fig. 1 Relative contributions of soil type, As pollution and rice cultivar to the variations of soil DOC and DON

水稻品种、As 污染及土壤类型对 DOC、DON 的影响程度不同,同时不同因子之间存在交互影响(图 1)。从环境因子的单独影响看,对于土壤 DOC 的变化,土壤类型因子的相对贡献率最大(27.6%),其次为 As 污染(15.5%)和水稻品种(7.7%)。与 DOC 不同,对 DON 变化的影响最大的因子是 As 污染(其相对贡献率为 24.2%),其次为水稻品种(14.7%),土壤类型的影响较小。

从环境因子的交互作用看,不同因子交互作用对 DOC 和 DON 的影响相似。虽然相对贡献率不同,但影响 DOC 和 DON 的交互作用主要是水稻品种与 As 污染之间、与土壤类型之间以及三者之间的交互作用,土壤类型与 As 污染的交互作用对 DOC 和 DON 影响较小。

### 3 讨 论

植物根系分泌物中含有可溶性糖、有机酸、氨基酸等组分,是土壤 DOC、DON 的重要来源。Lu 等<sup>[24]</sup>研究表明,种植一季水稻后,土壤 DOC 的 54%

来源于植物碳。大量研究表明,不同作物及同种作物的不同品种根系分泌物的组成和数量不同。耐低磷水稻品种与低磷敏感型品种根系分泌物中检出的有机酸种类和数量均有不同<sup>[25]</sup>;强化感水稻品种 PI312777 和弱化感水稻品种 Lemont 的根系分泌物中,有相同或相似的含氧萜类化合物,如柠檬烯氧化物、柠檬烯二氧化物、香芹酮氧化物、香芹醇、雪松醇等,但二者含氧萜类化合物含量的总量及单个物质含量均有差异<sup>[26]</sup>;扬稻 6 号和扬粳 9538 根系分泌的草酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸的浓度存在明显差异<sup>[27]</sup>;郜建红等<sup>[28]</sup>报道了水稻幼苗根系分泌物中有色氨酸、丙氨酸、亮氨酸等 17 种氨基酸和草酸、苹果酸、柠檬酸等 5 种有机酸。因此不同水稻品种可能由于根系分泌物组成和数量的差异影响土壤 DOC、DON 的含量。

As 污染主要是通过影响植物根系分泌物的组成和数量影响土壤 DOC、DON。在植物的耐受范围内,一定浓度的重金属污染刺激根系分泌物的分泌。强维亚等<sup>[29]</sup>的研究表明,Cd 胁迫(0.6、1.2 mmol L<sup>-1</sup> CdCl<sub>2</sub>)促进了大豆根系有机酸、多

肽、氨基酸及酰胺等有机化合物的分泌,使培养基质(蛭石)的有机碳、有机硫、全氮的含量有所升高。张玲和王焕校<sup>[30]</sup>的研究表明,低浓度 Cd ( $0.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ CdCl}_2$ ) 作用下小麦根系分泌的氨基酸含量有所增加,但在  $5 \sim 50 \text{ mg L}^{-1}$  的浓度范围内,氨基酸的分泌量随着 Cd 浓度的升高呈下降趋势,并在  $15 \text{ mg L}^{-1}$  时与无污染的含量相当。重金属的浓度超过了植物耐受的水平,植物细胞结构以及多种酶的活性会遭到破坏,影响植物的正常代谢活动及生长发育过程,根系的分泌活动也会受阻。目前 As 污染条件下水稻根系分泌物的变化研究较少,促进及抑制水稻根系分泌活动的 As 浓度范围也不清楚。本文发现土壤 DOC、DON 与有效砷含量负相关,相关系数分别为  $-0.554 (p < 0.01)$ 、 $-0.487 (p < 0.01)$ ,说明该浓度的 As 污染对某些品种的根系分泌活动产生了抑制作用。

以往的研究已经表明土壤 DOC、DON 与土壤性质密切相关。土壤有机质含量的高低及矿化速率的快慢直接影响 DOC、DON 的大小及周转速率。Filep 和 Rékási<sup>[31]</sup>通过逐步回归得出土壤有机质含量对 DOC、DON 的回归系数分别为  $0.28 (R^2 = 0.389, p < 0.001)$ 、 $0.53 (R^2 = 0.273, p < 0.001)$ ,表明土壤有机质对 DOC 和 DON 具有重要贡献。其研究还表明,pH 对 DOC、DON 的回归系数分别为  $0.22 (R^2 = 0.370, p < 0.001)$ 、 $-0.26 (R^2 = 0.126, p < 0.001)$ 。相对较高的 pH 会增加酸性功能团的解离而增加腐殖质的溶解性,但碳氮代谢途径的不同使 DOC、DON 受 pH 的影响程度不同<sup>[1]</sup>。本文 DOC、DON 的含量均与 pH 正相关,相关系数分别为  $0.713 (p < 0.01)$ 、 $0.288 (p > 0.05)$ ,与 Filep 和 Rékási 的结论不同,其原因可能是本研究的土壤 As 背景值较高,植物通过分泌有机酸和  $\text{H}^+$  以增加土壤中 Fe、Al、Ca 等金属离子的溶解性,与 As 形成铁型砷(Fe-As)、铝型砷(Al-As)、钙型砷(Ca-As)等难溶性 As,降低植物对 As 的吸收降低毒害作用。与种植水稻前相比,YCK、YAs、RCK、RAs 处理下土壤 pH 分别降低了 0.34、0.65、0.45、0.71,添加外源 As 的土壤较未添加的下降幅度更大。

本研究发现土壤类型对 DOC 影响最大,而 As 污染对 DON 影响最大,水稻品种与污染和土壤类型之间对 DOC 和 DON 均有交互作用。这一方面说明 As 污染对水稻土氮转化的影响较碳转化影响大,另一方面说明 As 污染和土壤类型(如养分条件)等通过影响不同水稻品种的生长从而影响了水稻土中

碳氮的转化。因此,在针对 As 污染水稻土选择耐 As 污染的水稻品种时,除了考虑水稻产量高、对 As 的吸收低的条件外,还可以考虑不同品种对土壤 DOC 和 DON 的影响,选择对土壤养分转化影响小的品种。

未来在揭示水稻品种对土壤 DOC 和 DON 影响的机制方面,需要进一步研究不同水稻品种根系分泌物在不同管理措施下在不同土壤中的变化规律;针对重金属污染稻田的利用,需要进一步筛选耐重金属污染的水稻品种,研究这些品种的根系分泌物特征及其对降低重金属污染的作用,为提出污染水田的利用对策提供理论依据。

## 4 结 论

土壤类型、As 污染、水稻品种对 DOC、DON 有显著影响。黄泥田 DOC 和 DON 的平均含量高于红泥田,DOC 含量平均高 18.3%,DON 含量平均高 31.4%;As 污染条件下土壤 DOC 和 DON 的平均含量降低,二者相比 DON 的下降幅度更大;种植杂交稻后 DOC 含量最高( $41.09 \pm 0.92 \text{ mg kg}^{-1}$ ),籼稻( $38.10 \pm 1.53 \text{ mg kg}^{-1}$ )和粳稻( $37.74 \pm 1.37 \text{ mg kg}^{-1}$ )稍低。种植粳稻的 DON 含量最高( $2.94 \pm 0.40 \text{ mg kg}^{-1}$ ),杂交稻次之( $2.61 \pm 0.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ),籼稻最低( $1.45 \pm 0.17 \text{ mg kg}^{-1}$ )。土壤类型、As 污染、水稻品种对土壤 DOC、DON 有交互影响:As 污染下,黄泥田和红泥田中,DOC 平均含量下降了 14.4%、11.1%,DON 分别下降了 65.0%、44.7%。As 污染下,种植杂交稻后 DOC 无显著变化,而种植粳稻和籼稻品种后 DOC 含量明显下降,其平均含量分别下降了 22.9% 和 12.4%;种植粳稻、杂交稻、籼稻后,DON 平均含量分别下降了 68.1%、65.6% 和 7.0%。不同水稻品种对土壤 DOC 和 DON 含量的影响会随着土壤类型和 As 污染水平而变化。水稻品种对 As 的耐受性差异,导致其对 DOC 和 DON 的影响不同。

## 参 考 文 献

- [1] Andersson S, Nilsson S I, Saetre P. Leaching of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in more humus as affected by temperature and pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1—10
- [2] Preston M D, Eimers M C, Watmough S A. Effect of moisture and temperature variation on DOC release from a peatland: Conflicting results from laboratory, field and historical data analysis.

- Science of the Total Environment, 2011, 409: 1235—1242
- [ 3 ] Filep T, Rékúsi M. Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary. *Geoderma*, 2011, 162: 312—318
- [ 4 ] Amiotte-suchet P, Linglois N, Leveque J, et al. <sup>13</sup>C composition of dissolved organic carbon in upland forested catchments of the Morvan Mountains (France): Influence of coniferous and deciduous vegetation. *Journal of Hydrology*, 2007, 335 (3/4): 354—363
- [ 5 ] Jiao Y, Xu Z, Zhao J H. Effects of grassland conversion to cropland and forest on soil organic carbon and dissolved organic carbon in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 150—154
- [ 6 ] Rosenqvist L, Kleja D B, Johansson M B. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon and nitrogen in a *Picea abies* chronosequence on former arable land in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 275—285
- [ 7 ] 田静, 郭景恒, 陈海清, 等. 土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响. *土壤学报*, 2011, 48(2): 338—346. Tian J, Guo J H, Chen H Q, et al. Effect of land use on composition of soil dissolved organic carbon (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 338—346
- [ 8 ] 高忠霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响. *土壤学报*, 2010, 47(1): 115—121. Gao Z X, Zhou J B, Wang X, et al. Effects of different fertilizer treatments on content and characteristics of dissolved organic carbon in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 115—121
- [ 9 ] Han L, Zhang Y L, Jin S, et al. Effect of different irrigation methods on dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in the greenhouse soil. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(8): 1175—1182
- [ 10 ] Wright A L, Hons F M, Matocha J E. Tillage impacts on microbial biomass and soil carbon and nitrogen dynamics of corn and cotton rotations. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29: 85—92
- [ 11 ] Hagedorn F, Blaser P, Siegwolf R. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and increased N deposition effects on dissolved organic carbon: Clues from δ<sup>13</sup>C signature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 355—366
- [ 12 ] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤溶解性有机碳 (DOC) 的影响因子及生态效应. *土壤通报*, 2007, 38(4): 758—764. Liu M, Yu W T, Jiang Z S, et al. Influencing factors and ecological effects of dissolved organic carbon in soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 758—764
- [ 13 ] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 2003, 113: 357—380
- [ 14 ] Khalid M, Soleman N, Jones D L. Grassland plants affect dissolved organic carbon and nitrogen dynamics in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 378—381
- [ 15 ] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. *林业科学*, 2005, 41(1): 10—13. Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 10—13
- [ 16 ] 高松, 谢丽. 中国土壤砷污染现状及修复治理技术研究进展. *安徽农业科学*, 2009, 37(14): 6587—6589, 6615. Gao S, Xie L. Soil arsenic contamination status in China and progress of remediation technology (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(14): 6587—6589, 6615
- [ 17 ] 朱志军, 聂逢君, 胡青华. 江西省德兴矿区土壤重金属污染的综合评价分析. *东华理工学院学报*, 2007, 30(4): 332—336. Zhu Z J, Nie F J, Hu Q H. Analysis of soil pollution by heavy metals in Dexing Mining Area, Jiangxi Province (In Chinese). *Journal of East China Institute of Technology*, 2007, 30(4): 332—336
- [ 18 ] Rahman M A, Hasegawa H. High levels of inorganic arsenic in rice in areas where arsenic-contaminated water is used for irrigation and cooking. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 4645—4655
- [ 19 ] Cieslinski G, van Rees K C J, Szmigielska A M, et al. Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation. *Plant and Soil*, 1998, 203(1): 109—117
- [ 20 ] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 422—429. Li S F, Yu Y C, He S. Summary of research on dissolved organic carbon (DOC) (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 422—429
- [ 21 ] Kwon-Rae K, Gary O, Ravi N, et al. Influence of plant roots on rhizosphere soil solution composition of long-term contaminated soils. *Geoderma*, 2010, 155: 86—92
- [ 22 ] 李永涛, 戴军, Thierry Becquer, 等. 不同形态有机碳的有效性在两种重金属污染水平下水稻土壤中的差异. *生态学报*, 2006, 26(1): 138—145. Li Y T, Dai J, Becquer T, et al. Availability of different organic carbon fractions of paddy soils under two heavy metal contamination levels (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 138—145
- [ 23 ] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 2006, 38: 991—999
- [ 24 ] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant photosynthates to dissolved organic carbon in a flooded rice soil. *Biogeochemistry*, 2004, 71: 1—15
- [ 25 ] 李德华, 向春雷, 姜益泉, 等. 低磷胁迫下水稻不同品种根系有机酸分泌的差异. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 186—188. Li D H, Xiang C L, Jiang Y Q, et al. Difference of organic acid secretion from roots of various rice varieties under the stress of low phosphorus (In Chinese). *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2005, 21(11): 186—188
- [ 26 ] 何华斌, 何华勤, 林文雄, 等. 不同化感水稻品种根系分泌物中萜类化合物的差异分析. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 732—736. He H B, He H Q, Lin W X, et al. Terpenoids in root exudates of different allelopathic rice varieties (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 732—736

- [27] 刘立军, 常二华, 范苗苗, 等. 结实期钾、钙对水稻根系分泌物与稻米品质的影响. 作物学报, 2011, 37(4): 661—669. Liu L J, Chang E H, Fan M M, et al. Effects of potassium and calcium on root exudates and grain quality during grain filling (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(4): 661—669
- [28] 郜红建, 常江, 张自立, 等. 镧对水稻根分泌物中氨基酸和有机酸含量的影响. 安徽农业大学学报, 2004, 31(1): 58—61. Gao H J, Chang J, Zhang Z L, et al. Effects of La<sup>3+</sup> on contents of amino acid and organic acid in root exudates of rice (*Oryza sativa* L.) (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural University*, 2004, 31(1): 58—61
- [29] 强维亚, 陈拓, 汤红官, 等. Cd胁迫和增强UV-B辐射对大豆根系分泌物的影响. 植物生态学报, 2003, 27(3): 293—298. Qiang W Y, Chen T, Tang H G, et al. Effect of cadmium and enhanced UV-B radiation on soybean root excretion (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(3): 293—298
- [30] 张玲, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化. 生态学报, 2002, 22(4): 496—502. Zhang L, Wang H X. Changes of root exudates to cadmium stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(4): 496—502

## EFFECTS OF RICE CULTIVARS AND ARSENIC POLLUTION ON SOIL DISSOLVED ORGANIC CARBON AND NITROGEN

Lei Chengxia<sup>1,3</sup> Chen Changqing<sup>1,3†</sup> Jiang Yuji<sup>2,3</sup> Sun Bo<sup>2,3</sup>

(1 Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 National Engineering Research and Technology Center for Red Soil Improvement, Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China)

**Abstract** A pot experiment was carried out using two different types of paddy soils (Yellow paddy soil and Red paddy soil) different in soil organic matter and pH, and 9 rice cultivars (three hybrid, three indica and three japonica) for exploration of effects of rice cultivars and arsenic (As) pollution on contents of DOC (dissolved organic carbon) and DON (dissolved organic nitrogen) in the soils and interactions among the three factors, rice cultivar, pollution and soil type. Results show that rice cultivars displayed a significant impact on content of DOC and DON in the soils, and followed a decreasing order of hybrid rice ( $41.09 \pm 0.92 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > indica rice ( $38.10 \pm 1.53 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > japonica rice ( $37.74 \pm 1.37 \text{ mg kg}^{-1}$ ) in terms of DOC, and of japonica rice ( $2.94 \pm 0.40 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > hybrid rice ( $2.61 \pm 0.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > indica rice ( $1.45 \pm 0.17 \text{ mg kg}^{-1}$ ) in terms of DON. As pollution decreased DOC and DON contents in the soils, but the effect varied with the rice cultivar. Compared with CK, As pollution decreased DOC by 14.4% and 11.1% and DON by 65.0% and 44.7%, in yellow and red paddy soils, respectively, and the drop of DOC was the least in soils cultivated with hybrid rice, and the drop of DON was in the soils cultivated with indica rice. The average contents of DOC and DON were 22.4% and 45.8% higher, respectively, in the yellow paddy soil than in the red paddy soil without As pollution, which was attributed mainly to the higher organic matter content and pH in the yellow paddy soil. Rice species, As pollution and soil type differed in their effects on soil DOC and DON, and was responsible for 7.7%, 15.5%, and 27.6% of the variation of DOC, and 14.7%, 24.2%, and 2.0% of DON, respectively.

**Key words** Dissolved organic carbon; Dissolved organic nitrogen; Rice cultivar; Yellow paddy soil; Red paddy soil; As pollution

(责任编辑: 卢萍)