

稻田生态系统中锌的平衡与调节*

钱金红 谢振翅

(湖北省农业科学院土壤肥料研究所, 武昌, 430064)

谢炎访 ✓

(湖北省仙桃市土壤肥料站)

S181

摘 要

本文研究了以水稻土和水稻为主体的土壤-植物系统中锌的内在及表现平衡机制, 包括有锌在土壤中的吸附解吸平衡及扩散迁移与富集, 植物对锌的吸收、积累和消耗。考察江汉平原常规稻田生态系统中锌的循环, 稻田土壤锌的输入途径及输入量大小依次为: 施肥(有机肥及化肥) > 降雨 > 灌溉 > 幼苗移栽; 输出途径主要是作物收获, 而田间排水和渗漏淋溶量极微。稻田土壤锌的收支平衡表现在土壤根层养分库中略有亏损, 但这一亏损并不使土壤耕层锌含量降低。为满足作物正常生长需要, 对有效锌缺乏的土壤仍须以施锌肥措施补充锌素, 本文提出了维持稻田生态系统锌素良性循环以及对作物适量供锌的调节原则和技术措施。

关键词: 水稻土, 生态系统, 锌循环, 锌平衡, 锌肥施用。

农田生态系统中营养元素的循环与平衡已广泛受到学者们的注意, 主要集中于氮、磷、钾三要素及早地农业生态系统的研究。微量元素养分的循环虽有一些报道^[1,2], 但涉及稻田生态系统的研究还不多见。微量元素锌是具有植物营养和污染毒害双重作用的元素, 在我国锌肥的应用研究, 包括肥效、施用技术, 丰缺诊断等均有相当基础。随着锌肥应用面积日益扩大, 研究其在土壤-植物系统中循环及平衡, 对维持锌对作物适量供应, 促进稻田生态系统中锌的良性循环以及控制环境质量均有重要意义。因此, 本文以锌肥应用面积最大的主要土壤类型(石灰性水稻土)和主要作物(水稻)为研究主体, 探讨土壤-植物系统中锌的平衡机制, 并考察江汉平原常规稻田生态系统中锌的循环, 提出相应的调控技术措施。

一、试验方法

1. 田间试验

在江汉平原石灰性水稻土等几种主要类型水稻土上设置施锌定位田间试验, 试验点分别设置于石首、潜江、武昌, 其土壤基本农化性状见表1。石首, 武昌点处理施用硫酸锌量为0、15、150 kg/hm², 连续施用4 a, 每年栽种早、晚两季水稻, 测定土壤剖面各发生层全锌和有效锌含量变化; 潜江点处理施用15 kg/hm²硫酸锌, 不施锌为对照, 每年种植早、晚两季水稻, 分区计产, 连续观察3a后效, 测定作物吸锌量和耕层土壤有效锌的含量变化。

* 国家自然科学基金资助项目(1986—1990)

本文于1991年2月28日收到。

表 1 试验土壤基本农化性状
Table 1 Physical and chemical properties of the soils

土 壤 Soils	地 点 Location	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ (g/kg±)	CEC (Cmol(+)/kg±)	有机质 (g/kg±) O.M.	有效锌 (mg/kg±) Avai. Zn
灰潮砂泥田 Calcareous alluvial clay	石 首 Shi shuo	8.0	57.5	19.21	34.64	0.50
灰潮土田 Calcareous alluvial loam	潜 江 Qian jiang	7.8	36.4	17.35	28.80	0.45
湖泥土田 Lacustrine clay soil	武 昌 Wu chang	6.5	1.3	18.67	36.50	0.68

2. 模拟试验

(1) 锌吸附及解吸试验 采取田间试验点水稻土样,按20:1的水土比例加不同浓度的锌液,恒温(25±1℃)振荡2h过滤,原子吸收法测定滤液锌的浓度,用Langmuir方程对吸附数据进行统计拟合,确定土壤锌的最大吸附量;土样分别加Zn 5、10、15 mg/kg,待吸附平衡后,分别用0.1mol/L Mg(NO₃)₂和0.005mol/L DTPA连续提取,水土比例2,25±1℃下振荡2h离心,原子吸收法测定上清液中锌的浓度,计算土壤锌的解吸量及固锌率。

(2) 扩散试验 土样标记⁶⁵Zn,用半池法测定锌的自扩散系数(Da),将标记和非标记土壤各自装到扩散半池中,饱和含水量下恒温(25±1℃)扩散15d后,分别测定两个半池放射性强度。用Ficks第二定律推导出的方程^[3]计算锌的Da值。

(3) 渗漏试验 用水泥池(130cm×100cm×70cm)2个,按发生层分层填装武昌湖泥土,两个池分别施Zn 1.5mg/kg(相当于农田常规锌肥施用量)和100mg/kg,用自来水(含Zn量0.05mg/kg)按降雨量250mm和500mm分次浇灌,分别分次测定底管渗出水锌含量。

3. 样品采集与分析

降水及灌溉水样于试验点分次采集,化肥有机肥样采取江汉平原几种主要氮肥、磷肥、钾肥、复合肥及有机肥品种,作物幼苗和籽实样分别在移栽和收获时采取,土样于作物收获后采取,各类水、土、肥、植物样分别用相应浸提剂提取^[4],原子吸收仪测定锌含量。⁶⁵Zn放射性强度用NaI晶体闪烁计测定⁶⁵Zn计数。

二、结果与讨论

1. 土壤中锌的吸持、运移与富集

(1) 锌的吸附固定及解吸释放 土壤锌的吸附-解吸平衡是锌在土壤中的重要化学行为,是锌在生态循环中的重要环节。对江汉平原几种类型水稻土进行锌的等温吸附研究表明,其吸附数据符合Langmuir等温吸附方程,不同土壤锌的最次吸附量变幅为1.12—4.18 mg Zn/g土,平均2.79mg Zn/g土,石灰性土壤最大吸附锌量最高达4.18mg Zn/g土,平均为3.63mg Zn/g土,占CEC的60.7%,而非石灰性土壤最大吸附锌量为1.12mg Zn/g土,仅占CEC的18.5%(表2)。可见石灰性土壤对锌的吸附容量比非石灰性土壤大得多。

锌被土壤吸附后,一部分被土壤组分所固定而变为无效态,一部分被解吸,与土壤溶液锌保持动态平衡。本研究对土壤吸附锌进行解吸试验,用不同强度浸提剂连续提取,模拟其解吸锌组分和数量以及固定锌量。用0.1mol/L Mg(NO₃)₂解吸出的锌,代表土壤中静电吸引和

专性吸附态的锌,主要是土壤代换态锌,是土壤有效锌库中对植物速效部分,试验结果表明,其解吸数量随土壤的不同变化很大,石灰性水稻土其解吸百分比平均为1.85%,而酸性土为7.0%(表2),这显然与土壤性质及胶体吸附特性有关,其中受土壤pH及CaCO₃含量影响显著。由0.005mol/L DTPA提取的锌是土壤中紧密吸附及结合形态的锌,是土壤有效锌库中

表2 土壤锌吸附、解吸及扩散试验结果

Table 2 Results of adsorption desorption and diffusion experiments on soil zinc

土 壤*	吸 附 Adsorption		解 吸 Desorption		锌固定率 (%) Rate of Zn fixation	Da×10 ¹⁰ (cm ² /s)
	最大吸附量 b (mg Zn/g) Adsorp. maxima	$\frac{b}{\text{CEC}} \times 100$	0.1mol/L Mg(NO ₃) ₂ (mg/kg)	0.005mol/L DTPA (mg/kg)		
1	4.18	66.9	0.17	1.95	78.8	0.69
2	3.07	64.4	0.20	2.03	77.7	1.05
3	1.12	18.5	0.70	2.38	69.2	3.43

* 1. 灰潮砂泥田 Calcareous alluvial clay; 2. 灰潮土田 Calcareous alluvial loam; 3. 湖泥土田 Lacustrine clay soil

对植物的缓效部分,从表2可以看出,其解吸率,石灰性土平均为19.9%略小于酸性土(23.8%),用DTPA提取后,仍保留在土壤中的锌是土壤所固定的锌,3种水稻土对锌的固定率为69.2%—78.8%,平均为75.2%,显然不同土壤对锌的固定率也与土壤pH及CaCO₃含量呈正相关。

(2) 锌在土壤中的迁移与富集 锌在水溶液中扩散系数为 $8.8 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$,而在土壤中扩散系数则大为降低,一般为 $3.6 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$,本试验用标记⁶⁵Zn半池法,测定几种水稻土锌的表现自扩散系数 Da 值变幅为 0.69×10^{-10} — $3.43 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$,平均为 $1.72 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ (表2),其中石灰性土壤平均为 $0.87 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$,大大低于非石灰性土壤 $3.43 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ 。

由于锌在土壤中的扩散系数极小,其在土体中的迁移淋失十分微弱,本研究通过渗漏试验,测定出不同加锌处理各次渗漏水中锌含量均为痕量,与非污染区自然地下水锌含量近似,显然这是土壤对锌的强烈吸附所致,这种吸附作用,使得环境中各种来源的锌都累积于土体中。适量锌是植物营养而超量锌对植物有毒害作用,所以要严格控制农田锌的进入量,否则一旦累积到污染水平,再要根除之就极为困难了。

土壤剖面中有效锌含量自上而下逐渐减少(表3),表土有效锌含量有明显的富集

表3 连续施锌土壤剖面有效锌含量分布(mg/kg)(湖泥土田,1986—1989)

Table 3 Content distribution of available Zn in soil profile with Zn applied in succession (Lacustrine clay soil, 1986—1989)

硫酸锌年用量 Annual rate of Zn sulphate applied (kg/hm ²)	耕 作 层 (0—18cm) Cultivated horizon				犁底层 (18—32cm) Plowpan	淋溶层 (32—60cm) Eluvium	淀积层 (60—80cm) Illuvium
	1986	1987	1988	1989	1989		
0	0.66	0.64	0.66	0.70	0.30	0.23	0.24
15	0.89	0.87	0.87	1.09	0.49	0.31	0.39
150	1.15	3.01	6.00	8.8	0.75	0.30	0.31

趋势,耕层量比犁底层高2.5—11.7倍,犁底层略高于淋溶层和淀积层,这与给水、施肥,生物活动以及不同土层氧化还原电位高低有关。连续4a施用不同量锌,土壤剖面有效锌含量,耕层增加量与施锌呈极显著正相关($r=0.9988^{**}$),犁底层增加量与施锌量有正相关趋势,其它层次受施锌量影响较小。土壤剖面各层全锌含量类似(图1),连续4a施15 kg/a·hm²硫酸锌,只有耕层有少量增加,仅增加4.1mg/kg,其它层次几乎没有增加;施用硫酸锌150 kg/a·hm²,耕层增加61.4mg/kg,其它各层仅增加4.1—9.0 mg/kg表明锌在土体中下移很少。

2. 稻田锌素的输入

(1) 降雨和灌溉 各试验点分次采集雨样,测定其含锌量为0.02—0.064mg/kg,平均为0.04 mg/kg。江汉平原稻区年降雨量为900—1400mm,平均为1200mm,按土壤实际接受量750mm计算,则每年接受降雨中的锌为300.0g/hm²。江汉平原稻区多引灌长江水,汉水含Zn量为0.0034mg/kg,长江水澄清液为0.0028 mg/kg,浊液为0.024mg/kg。采集各试验点实际灌溉水样,测定其平均含Zn量为0.012mg/kg,按年平均灌水量600mm计算,则每年稻田由灌水带入锌量72.0g/hm²。

(2) 肥料输入 表4列出了江汉平原主要有机肥及化肥品种的含锌量,不同有机肥种类含锌量差别较大,变幅为41.4—104.3mg/kg,加权平均为60.0mg/kg,按每年

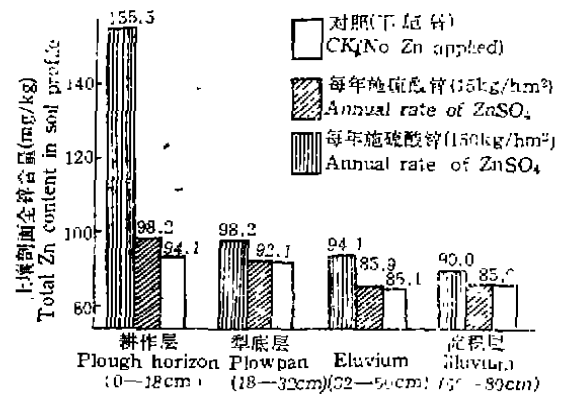


图1 连续4a施锌土壤剖面全锌含量分布
(灰潮砂泥田, 1986—1989)

Fig.1 Content distribution of total Zn in soil profile with Zn applied in succession (Calcareous alluvial clay, 1986—1989)

表4 有机及化学肥料的锌含量 (mg/kg)

Table 4 The Zn content of organic and chemical fertilizers

肥料品种 Variety of manure/fertilizer	锌含量 Zn content	样品数 Number of sample	肥料品种 Variety of manure/fertilizer	锌含量 Zn content	样品数 Number of sample
猪 粪 肥 Hog manure	63.93	4	尿 素 Urea	1.75	1
鸡 粪 Poultry manure	60.72	2	NH ₄ HCO ₃	1.10	2
沼 渣 肥 Waterlogged compost	62.86	3	NH ₄ Cl	3.66	1
棉 饼 Cotten cake	41.43	2	过磷酸钙 Lime superphosphate	64.52	3
豆 饼 Soybean cake	48.67	2	KCl	2.58	1
草 木 灰 Plant ash	104.29	2	复 合 肥 Compound fertilizer	21.91	3

平均施用量 $11.25\text{t}/\text{hm}^2$ 计算,则由有机肥料带入稻田的锌量为 $675.0\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$ 。氮磷钾及复合肥含锌量为 $1.1\sim 64.5\text{mg}/\text{kg}$,各种化肥品种按常规用量分别计算,则由化学肥料带入稻田的锌量为 $60.0\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$ 。

(3) 幼苗移栽 江汉平原稻区有代表性的耕作制是油-稻-稻,因此,移栽幼苗分别为油菜幼苗和水稻秧苗。油菜幼苗移栽带入稻田锌量为 $24.3\text{g}/\text{hm}^2$ 。双季早晚稻以常规稻插入稻田苗数计算,早稻秧苗带入锌 $11.85\text{g}/\text{hm}^2$,晚稻秧苗带入锌 $17.4\text{g}/\text{hm}^2$ 。

综上所述,由给水、施肥和幼苗移栽等途径对土壤输入锌量合计为 $1160.55\text{g}/\text{a}\cdot\text{km}^2$ 。

3. 作物对锌的吸收、积累和消耗

作物一般通过根部溶解离子的扩散和向根液流吸收土壤中的锌,水稻锌素营养主要是来自土壤,对肥料锌的吸收仅占吸锌总量的一小部分,我们曾用不同水稻土做盆栽试验,结果表明水稻植株吸锌的 $84.6\%\sim 96.1\%$ 由土壤提供,仅 $3.9\%\sim 15.4\%$ 取自肥料^[8],所以施用的锌肥,利用率极低,其中早稻为 $1.2\%\sim 3.5\%$,当年晚稻为 $0.6\%\sim 1.5\%$ ^[9],大量锌肥仍残留在土壤中。测定水稻植株对来自土壤和肥料锌的吸收总量,其累积分布是营养器官高于繁殖器官,根、茎叶和籽实的含锌量分别为 $65.2\sim 80.7$, $35.4\sim 41.5$ 和 $21.4\sim 24.6\text{mg}/\text{kg}$,由于锌在植株体内移动性差,吸收的锌主要累积于根部,其次是茎叶,籽实含量最低。根系累积的锌将全部以残茬形式还田,植株吸收带走的锌主要是地上部分——茎叶、籽实。以产稻谷 $12.75\text{t}/\text{hm}^2$,稻草 $15\text{t}/\text{hm}^2$,籽实、茎叶(稻草)平均含锌量 23.0 和 $28.3\text{mg}/\text{kg}$ 计算,则稻谷总含锌量为 293.25g ,稻草为 574.5g ,两项之和即为水稻地上部分带走的锌量为 $867.75\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$ 。

油菜各部位含锌量与水稻大体相似,以产油菜籽 $1.65\text{t}/667\text{m}^2$,含锌量 $25.6\text{mg}/\text{kg}$,油菜茎秆枝荚 $10.05\text{t}/667\text{m}^2$,含锌量 $40.1\text{mg}/\text{kg}$ 计算,则油菜地上部分带走的锌量 $445.2\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$ 。

4. 水稻土锌的收支平衡及其调控

石灰性水稻土缺锌临界值为 $0.5\sim 0.7\text{mg}/\text{kg}$ (DTPA-Zn),江汉平原稻区土壤主要发育于江河冲积母质,具有不同程度的石灰性反应,pH值在中性和碱性范围,加之低温冷浸,使得大面积的水稻土都处于缺锌临界值以下,土壤有效锌不足是水稻生产特别是早中稻生产的重要限制因子。从农田锌的收支平衡角度来看,由于土壤锌的扩散及迁移作用都极其微弱,所以由土体渗漏淋失的锌量极少,水稻土锌的损失主要是油菜和水稻地上部分茎叶和籽实吸收带走的锌,根据测算,这部分带走的锌大约为 $1312.95\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$,而由施肥、给水以及幼苗移栽对土壤提供锌 $1160.55\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$,收支两抵净支出锌 $152.4\text{g}/\text{a}\cdot\text{hm}^2$ 。这一净亏损锌量可使根层土壤锌含量降低 $0.023\text{mg}/\text{kg}$,但并不使耕层土壤锌含量降低。在不施锌肥条件下,耕层有效锌含量基本保持平衡(表3,表5),这是因为各种外源锌及根茬锌主要是进入土壤耕层,同时由于锌在土体中迁移淋溶十分微弱,故使得土壤耕层锌含量有相对富集的趋势。

各种来源的锌进入土壤后,很快被土壤所吸附,并参与土壤的各种理化反应,很快与土壤各形态锌包括有效态锌达到动态平衡。作物吸锌量取决于土壤有效锌的水平,土壤有效锌则受土壤理化性质及环境因子的综合作用所左右,包括土壤类型(母质)、pH、碳酸盐含量,有机质、CEC施肥以及温湿气候条件等,都能不同程度地影响土壤有效锌状况^[7]。要

想采取适当的农田技术措施调节这些影响因子,来维持土壤有效锌的适量供应,那是十分困难的。试验研究和生产实践证实,在缺锌地区直接施用锌肥能有效地矫正土壤和作物缺锌,所以在有效锌低于临界值的田块,还得以锌肥形式补充锌素以满足作物对吸锌的正常需要。

表 5 锌肥增产效应及土壤有效锌含量变化 (灰潮土田, 1985—1989)

Table 5 The yield effect of Zn applied and change of soil available Zn (Calcareous alluvial loam, 1985—1989)

项 目 Index	硫酸锌用量 Rate of Zn sulphate (kg/hm ²)	1985	1986	1987	1988	1989
土壤有效锌 (mg/kg) Soil available Zn	0	0.40	0.40	0.45	0.50	0.38
	15	1.90	1.85	1.70	1.22	0.69
稻谷产量 Yield of rough rice (kg/hm ²)	0	10125	7526	8067	8643	8610
	15	11211	8543	8525	9050	8600
施锌增产(%) Yield increase with Zn applied		10.7**	11.0**	5.7	4.7	-0.1

**增产达 1% 显著水准 Significant at 1% level.

由于土壤组分对锌的强烈吸附和固定,使其不易流失,锌肥的施用一定要以减少锌的固定累积,提高锌肥的利用效益为前提。研究指出,叶面喷施(0.2%硫酸锌液)和沾秧根(2%—4%氧化锌悬浊液)等方法,锌肥用量小,土壤残留少,然而因水稻叶片特征,前者的施锌效果不够理想,而后者能使锌在根系周围有较高浓度,保证当季作物有效锌的足量供应,锌肥效应显著。施用秒口肥15kg/hm²硫酸锌,亦能取得与沾秧根同等增产效果,虽成本略有提高,但方法简便省时,更能为农民所接受。在缺锌土壤上进行长期定位试验表明(表5),早稻基施15kg/hm²硫酸锌增产效果显著,然而如前所述其锌利用率极低(仅1.2%—3.5%),所以大部分锌肥滞留于土壤中,对作物产生后效作用,第二年后效仍达到极显著水平,第三年增产率锐减,所以土壤基施锌肥可以隔年施用1次。

在栽种若干季作物,残留锌肥基本上被土壤固定,使土壤有效锌又回到原有的水平上,土壤有效锌与土壤理化条件及水气热环境保持着一种平衡机制,有报道指出,连续栽培作物耗锌也并不降低土壤有效锌水平^[8]。鉴于此,锌肥应用只能使土壤有效锌水平暂时得到提高,增加作物吸锌,使作物增产,施用锌肥提高土壤有效锌含量的比率与稻谷增产率呈显著正相关($r=0.9501^*$)(表5)。缺锌土壤补充锌的同时还要注意营养平衡,与氮、磷、钾等大量元素配合施用也是保证锌肥有效利用的一个途径,通过多点试验得到, N、P、K、Zn 的适宜配比为1:0.4:0.5:0.02^[9],在这个配比下,锌肥施用最为经济有效,并且安全无害。

参 考 文 献

- [1] 谢家恕等,水-土-植物系统中锌的迁移和累积,农村生态环境,1987,(4):27—30
- [2] Sakurai, Y. et al, Cycling of zinc and selenium in agricultural ecosystems, Transactions of 14th Int. Cong. of Soil Sci. Symposium I, 1980, 369—370.
- [3] Brown, D.A., et al., Ion diffusion, I. A quick freeze method for the measurement of ion

- diffusion in soil and clay system, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 1964, 28:628—632.
- [4] 中国科学院南京土壤所编著,《土壤和植物中微量元素分析》,科学出版社,1979,58—105,390—395.
- [5] 钱金红、谢振翅,湖北省主要水稻供锌特性与施锌效应的研究,《中国农业学报》,1989,22(6):59—65.
- [6] 谢振翅等,水稻缺锌研究,《土壤养分、植物营养与合理施肥》,农业出版社,1981,163—170.
- [7] 谢振翅等,湖北省土壤中锌的含量分布与施肥应用,《微量元素研究与应用》,湖北科技出版社,1986,155—171.
- [8] 钱金红、谢振翅,土壤锌的化学行为及其对作物供锌特征的研究,《硫磺和微量元素在作物营养平衡中的作用国际学术研讨会论文》,成都,1991,31—33.
- [9] 谢振翅、钱金红,水稻钾素营养与水稻氮、磷、钾配合施用研究,《国际平衡施肥学术讨论会论文集》农业出版社,1989,341—346.
- [10] Pinsky, D.L., Behaviour of heavy metals in Soil-plant system, *Transactions of 14th Int Cong. of Soil Sci. Symposium I*, 1990, 348—349.
- [11] Randhawa, N.S., et al, Management of micronutrients in rice soil, *Transaction of 12th Int. Cong. of Soil Sci. Symposium paper 2*, 1982, 192—202.

BALANCE AND ADJUSTMENT OF ZINC IN PADDY FIELD ECOSYSTEM

Qian Jin-Hong Xie Zhen-Chi

(Soil and Fertilizer Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuchuang 430064)

Xie Yan-Fang

(Soil and Fertilizer Station, Hubei Xiantao city)

The experiments were conducted to study zinc adsorption and desorption equilibrium, zinc diffusion, move and enrichment in soil, and zinc uptake, accumulation and consumption of plant in paddy and paddy soil system.

It was investigated that input and output of zinc in paddy soil for illustrating the cycle of zinc in paddy field ecosystem. Input way and input amount of zinc in proper order were fertilization(organic and chemical fertilizers) > rainfall > irrigation > seedling transplantation; Output way of zinc was mainly crop harvest, while field drainage and soil body leaching of zinc were very little. Zinc income and expenses balance in paddy field was a little deficit in nutrient pool of soil root horizon, which didn't decrease zinc content of soil plough horizon. However, zinc fertilization was still needed to replenish zinc for crop growing normally on the zinc deficient soil. In this paper, it were put forward the adjusting principles and technical measures for maintaining suitable zinc-supplying to crop and fine zinc-cycling in paddy field ecosystem.

Key words paddy soil, ecosystem, zinc cycle, zinc balance, zinc fertilization.