

# 稻田流失养分循环利用系统构建研究初探

刘红江, 陈留根, 朱普平, 盛婧, 张岳芳, 郑建初\*

江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014

**摘要:** 针对长江三角洲经济发达地区集约化农田化肥投入过量、稻区水体 N、P、K 富集度超高, 农田生态环境遭到严重破坏等现状, 该文系统研究了农田流失养分从农田到水体, 再由水体回到农田的循环利用过程, 并构建农田养分流失循环利用系统工程, 为我国农田流失养分循环利用和农业生态环境健康提供科技支撑。研究结果表明: 本区域农田面积为 18.6 hm<sup>2</sup>, 水稻季农田化肥 N、P、K 投入量分别为 305.7、44.9、150.8 kg·hm<sup>-2</sup>; 整个水稻季本区域农田地表径流量为 4 518.0 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中 N、P、K 流失量分别为 16.6、0.5、9.6 kg·hm<sup>-2</sup>, 占水稻季 N、P、K 肥投入量的 5.45%、1.07% 和 6.37%; 农田周围净化池塘中水生植物的 N、P、K 拦截量分别为 67.8、8.1、99.7 kg, 分别占本研究区域 N、P、K 流入量的 21.84%、90.31% 和 55.73%。将水生植物还田, 晒干水葫芦(*Halerpestes cymbalaria*)按 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> 农田施用, 可分别减少农田化肥 N、P、K 的投入量 106.2、9.5、105.8 kg·hm<sup>-2</sup>。该研究成果对于减轻农业生产面源污染, 推进农业生产可持续发展具有积极意义。

**关键词:** 稻田; 地表径流; 流失养分; 养分拦截; 循环利用

**中图分类号:** S181

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2010) 10-2275-05

随着农业生产的发展, 为了提高水稻单产, 农民正逐年加大农田化肥的投入量, 特别是太湖流域稻区部分高产田的施氮量为 270~300 kg·hm<sup>-2</sup>, 甚至高达 350 kg·hm<sup>-2</sup>, 过高的氮肥投入不仅使得氮肥利用率过低, 而且直接和间接地导致了一系列不良的环境反应<sup>[1-3]</sup>。投入农田的化肥, 很大一部分会通过地表径流<sup>[4-7]</sup>等方式进入农田周围的水体中, 使水体污染呈富营养化, 进一步恶化了水体环境<sup>[8]</sup>。大量研究表明, 水葫芦具有很强的吸收富营养化水体中 N、P 的能力, 能够在短期内迅速将水体 N、P 富集于体内<sup>[9-12]</sup>, 使其自身体内 N、P 含量明显高于其它植物<sup>[13]</sup>。富营养化水体中水葫芦植株本身富含 N、P、K, 作为有机肥料还田, 使农田中流失养分得以循环利用, 减轻农田对周围环境的面源污染。已有研究表明, 水葫芦农田施用能够增加农田土壤 N、P 含量<sup>[12]</sup>, 并能够显著提高水稻产量<sup>[14]</sup>。

在前人研究基础上, 进一步明确农田养分的投入和流失量, 对农田流失养分进行生物拦截及农田再利用研究, 构建农田流失养分循环利用系统工程技术体系, 以期为我国农田流失养分循环利用, 农业生态安全和环境健康提供试验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于 2009 年 5—11 月在江苏省无锡市安镇

太湖水稻示范园试验田(31°37'N, 120°28'E)进行, 土壤类型为黄泥土, 年降水量 1 100~1 200 mm, 年均温 16 °C, 年日照时数>2 000 h, 年无霜天数>230 d, 耕作方式为水稻、冬小麦轮作。土壤基本理化性质: 总 N 5.8 g·kg<sup>-1</sup>, 速效 N 42.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 总 P 0.5 g·kg<sup>-1</sup>, 速效 P 49.9 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效 K 246.8 mg·kg<sup>-1</sup>, 容重 1.2 g·cm<sup>-3</sup>, 有机碳 1.5%, pH 6.8。

### 1.2 研究对象概况

本研究以中小型农田灌排区为基本单元, 农田面积为 18.6 hm<sup>2</sup>, 明确农田养分总的投入量, 以及农田养分通过水体地表径流的输出量。农田径流口的高度为每次灌水所需田间最大存水量的高度, 多余的部分让其自动流出。通过在农田排水沟出口处(图 1)装置流量计测定每次发生径流的排水量, 同时每次排水时, 取水样测定水体中养分含量, 计算出养分的输出量。农田径流水流向排水沟, 通过流量计以后全部汇集于农田周围水体净化塘, 在池塘种植不同水生植物(水葫芦 *Halerpestes cymbalaria*、水浮莲 *Eichhornia crassipes*、睡莲 *Nymphaea tetragona*、美人蕉 *Canna indica*), 吸附农田水体养分, 净化农田水体。在水生植物生长期间, 定期采集各水生植物样品, 测定其生物量和养分含量。水稻收获后, 将净化池塘中的水生植物打捞还田。构建农田养分循环利用系统工程技术体系。

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2007BAD89B12); 江苏省博士后基金项目(0902035C); 江苏省农业科学院博士后基金项目(6510907)

**作者简介:** 刘红江(1979年生), 男, 博士, 主要从事农业生态和水稻栽培生理生态研究。E-mail: Liuhongjiang2004@sohu.com

\*通讯作者: E-mail: zjc@jaas.ac.cn

**收稿日期:** 2010-09-15



图1 排水沟中流量计

Fig.1 Flowmeter in the barrel-drain

### 1.3 测定内容与与方法

#### 1.3.1 稻田化肥投入量的记载

稻田每次施肥时记载施肥量,得到稻田化肥的总投入量。

#### 1.3.2 农田地表径流流量测定

在农田的排水口安装 50 t 明渠流量计,每次发生地表径流时,测定地表径流水量。

#### 1.3.3 水体 N、P、K 质量浓度测定

在农田每次发生地表径流时取水样,分别采用紫外分光光度法、紫外消解钼蓝比色法和火焰光度法测定水中全 N、全 P、全 K 的质量浓度。

#### 1.3.4 植物植株 N、P、K 质量分数测定

水稻收获后,将净化池塘中的浮水植物打捞,池塘周围的挺水植物收割,分别晒干称质量。抽样粉碎后,样品经  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮,进行 N、P、K 质量分数的测定。N 采用靛酚蓝比色法, P 采用钼锑抗比色法, K 采用火焰光度法测定。

### 1.4 统计分析方法

采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,作图采用 Excel。各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法,凡超过  $LSD_{0.05}$  (或  $LSD_{0.01}$ )水平的视为显著(或极显著)。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻季农田养分投入量

本研究整个区域农田面积为  $18.6 \text{ hm}^2$ , 稻季总施肥量 N、P、K 肥分别为 5 696.0、836.0、2 10.0 kg, 单位面积 N、P、K 施用量分别为  $305.7$ 、 $44.9$ 、 $150.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

### 2.2 稻季农田地表径流流量

通过农田排水口的流量计,测定地表径流量。农田地表径流量的动态变化情况如图 2 所示。由图 2 可知,在水稻移栽后至 7 月上旬,农田地表径流量在  $1.3 \times 10^5 \sim 2.9 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  左右; 7 月中旬以后,

由于该地区降雨量的增加,流失量有逐步增加的趋势,到 7 月下旬出现最大峰值,达到  $6.2 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 8 月上、中旬到 9 月底径流量又趋于平缓。稻季总径流量约为  $4.5 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

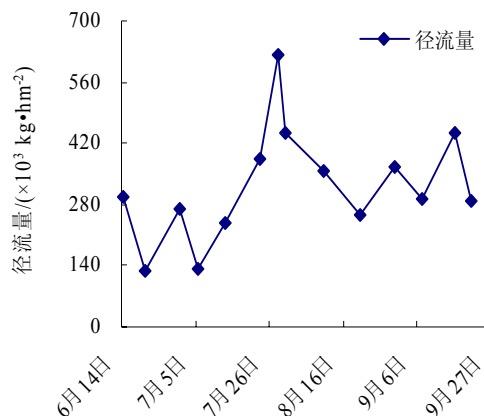


图2 稻季农田地表径流量

Fig.2 Variation of overland runoff in rice season

### 2.3 稻季农田地表径流水体总 N、P、K 流失量

#### 2.3.1 稻季农田地表径流水体总 N 流失量

稻季农田地表径流中总 N 流失量的变化规律如图 3 所示。由图 3 可知,稻季农田地表径流总 N 流失量出现 2 个高峰,依次在 6 月底和 8 月初,这是稻田中的 N 肥施用时期和使用量以及这两个时间段降雨量较大共同作用的结果。在整个水稻季中,本排灌单元农田地表径流水体中总 N 流失量为  $310.2 \text{ kg}$ ,折合为  $16.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占水稻季 N 肥总投入量的 5.45%。

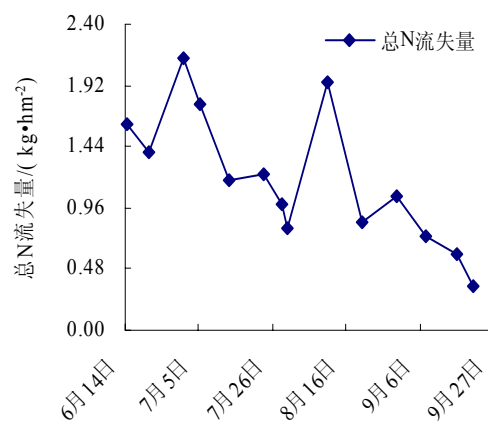


图3 稻季农田地表径流水体中总 N 流失量

Fig.3 Variation of total nitrogen carried by overland runoff in rice season

#### 2.3.2 稻季农田地表径流水体总 P 流失量

稻季农田地表径流水体中总 P 流失量的变化规律如图 4 所示。由图 4 可知,农田地表径流水体中总 P 流失量在水稻移栽后至 7 月上旬维持在比较高

的水平,其峰值出现在6月底。在整个水稻季中,本排灌单元农田地表径流水体中总P流失量为8.9 kg,折合为 $0.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占水稻季P肥总投入量的1.07%。

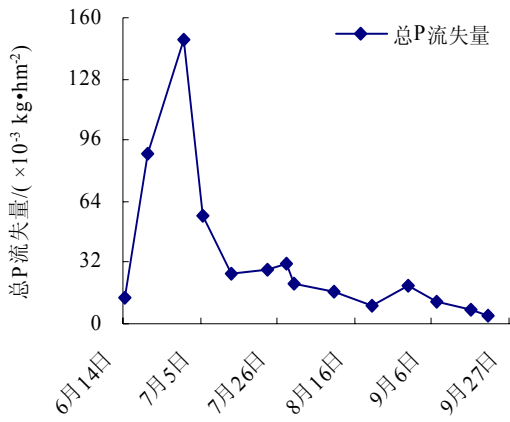


图4 稻季农田地表径流水体中总P流失量  
Fig.4 Variation of total phosphorus carried by overland runoff in rice season

### 2.3.3 稻季农田地表径流水体总K流失量

稻季农田地表径流水体中总K流失量的变化规律如图5所示。由图5可知,农田地表径流水体中总K流失量的变化趋势大致呈一个单峰曲线,其峰值出现在7月下旬,这可能与这一时间段,作为穗肥的K肥施用量较大以及降雨量大密切相关。在整个水稻季中,本排灌单元农田地表径流水体中K流失量为178.9 kg,折合为 $9.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占水稻季K肥总投入量的6.37%。

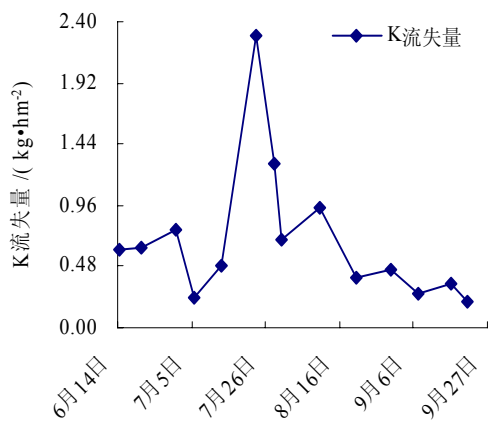


图5 稻季农田地表径流水体中总K流失量  
Fig.5 Variation of total kalium carried by overland runoff in rice season

综上所述,稻季农田地表径流水体中N、K的流失量要明显大于P。稻田N、P、K的流失量是施肥时期和施肥量共同作用的结果,从图3~图5中出现峰值的时期来看,施肥时期对稻田养分流失量的

影响较大。因此在农业生产中,施肥量较大的时期,应当使田间保持较浅水层,并尽量避免在暴雨前施肥,以降低稻田养分地表径流流失风险。

## 2.4 净化池塘中水生植物的配置、生物量、养分拦截量及农田利用

### 2.4.1 净化池塘中水生植物的配置

在水稻移栽前,根据不同水生植物品种对水体养分拦截能力不同以及景观效果,植物配置如图6。图中由远至近,从农田排水口到池塘出水口依次为:水葫芦、睡莲、水浮莲、美人蕉。种植面积分别为:1300、1000、1300、200  $\text{m}^2$ 。



图6 净化池塘中水生植物种植分布图  
Fig.6 The position of different type hydrophytes in decontaminator pool

池塘周围河边种植挺水植物,有慈菇(*Sagittaria sagittifolia*)、茭白(*Zizania caduciflora*)、

空心菜(*Lpomoea aquatica*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、蒲草(*Typha angustifolia*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。

### 2.4.2 水生植物生物量、养分拦截量

在水生植物生长后期测定其生物量和养分质量分数,不同品种水生植物:水葫芦、睡莲、水浮莲和美人蕉的生物量(以干物质计)分别为1194.4、626.7、931.7和386.7 kg。N、P、K养分拦截量分别为63.7、7.5、94.6 kg(表1)。

表1 净化塘中不同品种水生植物养分总拦截量  
Table 1 Total nutrient accumulation of different type hydrophytes in Decontaminator pool kg

水生植物	$m(\text{N})$	$m(\text{P})$	$m(\text{K})$
水葫芦	28.2	2.5	28.0
水浮莲	18.2	2.0	26.2
睡莲	10.8	2.3	12.5
美人蕉	6.4	0.8	27.9
合计	63.7	7.5	94.6

池塘周围挺水植物慈菇、茭白、空心菜、千屈菜、蒲草、菖蒲、芦苇的生物量(以干物质计)分别为4.4、18.0、73.3、56.4、19.7、8.6和15.6 kg。N、

P、K 养分拦截量分别为 4.1、0.6 和 5.1 kg。池塘中所有水生植物 N、P、K 养分拦截量分别为 67.8、8.1、99.7 kg。分别占区域 N、P、K 流入量的 21.84%、90.31%、55.73%。

#### 2.4.3 水生植物的农田利用

将晒干水葫芦按 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> 还田, 水葫芦体内 N、P、K 质量分数分别为 2.36%、0.21%、2.35%, 因此农田可减少化学肥料 N、P、K 的投入量分别为 106.2、9.5 和 105.8 kg·hm<sup>-2</sup>。刘红江等<sup>[14]</sup>研究表明, 水葫芦稻田施用, 能够显著提高水稻产量。盛婧等<sup>[15]</sup>研究表明, 小麦田施用水葫芦能够明显培肥地力, 增加农田土壤速效 P、K 含量。说明农田施用水葫芦不仅能够增加粮食产量, 还能够减少农田化肥投入, 减轻农业生产面源污染, 是一种良性的农田养分循环利用模式。

#### 2.5 农田流失养分循环利用系统工程构建

在无锡市锡山区安镇完成了农田—净化塘养分循环系统工程的构建。农田面积为 18.6 hm<sup>2</sup>, 净化塘面积为 0.4 hm<sup>2</sup>。农田净化塘比例为 46:1。所有农田排水汇集到净化塘中。

农田流失养分循环利用过程: 由农田经过排水沟到净化池塘, 在净化池塘中种植水植物, 通过水生植物拦截农田水体流失养分, 再将水生植物打捞以后还田, 实现水生植物的循环利用。同时将净化塘中水循环利用, 水循环不足情况下, 通过外河补水。

本排灌单元农田面积为 18.6 hm<sup>2</sup>, 稻季农田地表径流总 N 流失量为 310.2 kg。综合考虑不同水生植物对水体养分拦截能力不同以景观效果后, 净化塘水生植物实际种植面积为 3 800 m<sup>2</sup>。水生植物的总 N 富集量为 67.8 kg, 占区域 N 流入量的 21.84%。

### 3 结论

试验表明, 稻季农田养分会通过地表径流流失到农田周围的水体中去, 通过在农田周围水体种植水生植物, 能够拦截农田水体分 N、P、K 的流失, 通过富集于水生植物的体内, 以达到减少农业生产对周围环境的污染。在水稻收获以后, 将水生植物打捞收获还田, 实现农田流失养分的循环利用。水生植物农田施用, 不但能够减少农田化肥的投入量, 还有利于培肥地力, 提高土壤的速效养分含量, 保证稻麦获得稳产高产。由于水生植物农田施用, 减少了农田化肥的投入, 可为农业生产带来直接经济效益; 同时化肥投入量的减少, 可进一步减轻农田对周围水体的污染, 提高农业生产的生态效益。构建了农田流失养分循环利用系统工程, 为长江三角洲地区农田循环生产提供技术支持, 对该地区减少农田化肥的过量投入, 保证农田养分的高效利

用, 缓解水体富营养化, 实现农作物高产和农业生态环境安全具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456-1461.  
LIU Lijun, SANG Dazhi, LIUCuilian, et al. Effects of real-time and site specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Agricultural Science, 2003, 36(12): 1456-1461.
- [2] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 等. 秸秆还田与实氮肥管理对水稻产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(10): 209-215.  
XU Guowei, WU Changfu, LIU Hui, et al. Effect of straw residue returned and site-specific nitrogen management on yield and quality of rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(10): 209-215.
- [3] 单玉华, 王余龙, 黄建晔, 等. 中后期追施 N 对水稻氮素积累与分配的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(4): 18-21.  
SHAN Yuhua, WANG Yulong, HUANG Jianye, et al. Effect of nitrogen fertilizer applied at middle and late growing stages on N uptaked and distribution in rice[J]. Jiangsu Agricultural Research, 2000, 21(4): 18-21.
- [4] 段亮, 常江, 段增强. 地表管理与施肥方式对太湖流旱地磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 24-28.  
DUAN Liang, CHANG Jiang, DUAN Zengqiang. Surface managements and fertilization modes on phosphorus runoff upland in Taihu Lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 24-28.
- [5] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 环太湖丘陵地区农田磷素随地表径流输出特征[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 165-169.  
WANG Peng, GAO Chao, YAO Qi, et al. Agricultural phosphorus losses with overland runoff in hilly area around Tai Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 165-169.
- [6] 李恒鹏, 黄文钰, 杨桂山, 等. 太湖上游典型城镇地表径流面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1598-1602.  
LI Hengpeng, HUANG Wenyu, YANG Guishan, et al. Non-point source pollutant concentration in typical towns of Taihu upriver region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(6): 1598-1602.
- [7] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 环太湖典型丘陵区不同土地利用下土壤磷素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 826-830.  
WANG Peng, GAO Chao, YAO Qi, et al. Characteristics of agricultural phosphorous losses with surface runoff under different land uses in hilly area around Taihu lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 826-830.
- [8] 郑建初, 常志州, 陈留根, 等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 3: 247-250.  
ZHENG Jianchu, CHANG Zhizhou, CHEN Liugen, et al. Study on feasibility of hyacinth treating water N and P pollution in the Taihu Lake area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008, 3: 247-250.
- [9] AMANDA M N, WILLIAM J M. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(3): 246-257.
- [10] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447-1450.

- TONG Changhua, YANG Xiao'e, PU Peimin. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1447-1450.
- [11] POLOMSKI R F, TAYLOR M D, BIELENBERG D G, et al. Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands[J]. Water Air and Soil Pollution, 2009, 197(1/4): 223-232.
- [12] 盛婧, 郑建初, 陈留根, 等. 水葫芦富集水体养分及其农田施用研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2119-2123.
- SHENG Jing, ZHENG Jianchu, CHEN Liugen, et al. Absorption of water nutrients by hyacinth and its application in wheat production[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(10): 2119-2123.
- [13] 张秋芳, 刘波, 官雪芳, 等. 水葫芦对氮磷营养的需求及分布规律初探[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 387-389.
- ZHANG Qiufang, LIU Bo, GUAN Xuefang, et al. Requirement and distribution of nitrogen and phosphorus in water hyacinth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5): 387-389.
- [14] 刘红江, 陈留根, 朱普平, 等. 农田施用水葫芦对水稻产量形成的影响[J]. 中国农学通报.
- LIU Hongjiang, CHEN Liugen, ZHU Puping, et al. Effects of Hyacinth Mulching on Yield Formation of Rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin.
- [15] 盛婧, 陈留根, 朱普平, 等. 高养分富集植物凤眼莲的农田利用研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 46-49.
- SHENG Jing, CHEN Liugen, ZHU Puping, et al. Field application of hyacinth (*Eichharnia crassipes*), a strong nutrient accumulating plant[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 46-49.

## Primary study on building recycling system of rice paddy loss nutrient

LIU Hongjiang, CHEN Liugen, ZHU Puping, SHENG Jing, ZHANG Yuefang, ZHENG Jianchu\*

Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China

**Abstract:** As intensive agriculture in economically developed Yangtze River Delta areas inputs excess fertilizer and N, P, K enrichments of rice water are ultrahigh, agricultural ecological environment has been seriously damaged. Field experiment was conducted by measuring the loss of nutrients from rice paddy to the water and back to the rice paddy from water, to build recycling systems engineering of rice paddy loss nutrient and supply technologic support for recycling systems engineering and healthy agricultural ecological environment. The results show that: The area of rice paddy area of 18.6 hm<sup>2</sup>, chemical fertilizer N, P, K in rice season inputs were 305.7, 44.9, 150.8 kg·hm<sup>-2</sup>; the rice season overland runoff water was 4 518.0 kg·hm<sup>-2</sup>, in which N, P, K losses were 16.6, 0.5, 9.6 kg·hm<sup>-2</sup>, accounting for N, P, K fertilizer inputs of 5.45%, 1.07%, 6.37% respectively; N, P, K hold-up of the pond aquatic purification plant around rice paddy are 67.8, 8.1, 99.7 kg, accounting for the study area N, P, K inflows of 21.84%, 90.31%, 55.73% respectively. Using dried water hyacinth back to rice paddy under 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> can reduce chemical fertilizer N, P, K inputs by 106.2, 9.5, 105.8 kg·hm<sup>-2</sup>. The research achievement is of positive significance to reduce pollution on agricultural production and promote sustainable development of agricultural production.

**Key words:** rice paddy; overland runoff; nutrient loss; nutrient hold up; recycling