

海河流域水稻田氮磷地表径流流失特征初探

陈颖¹, 赵磊¹, 杨勇¹, 孙春元², 张晓岚³

(1.天津市环境保护科学研究院, 天津 300191; 2.天津市宁河县农业局, 天津 301500; 3.北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:选取海河流域水稻田作为研究对象,在自然降雨条件下通过田间实测方法研究其氮磷元素地表径流流失特征。结果表明,氮磷元素流失率分别为0.7%和0.6%,流失负荷分别为 $4.77\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2.08\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在详细分析试验结果后,找出影响氮磷地表径流流失量的因素,其中颗粒态氮是农田径流流失的主要形式,并与径流量成明显正向相关,而磷素流失量则受施肥量和径流量双重影响,影响规律较氮素更为复杂,尚需进一步研究。进而得出结论:在北方干旱少雨的气候影响下,地表径流并非海河流域农田种植作物氮磷元素流失的首要途径。

关键词:海河流域;水稻;地表径流;氮磷流失

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)02-0328-06

Preliminary Study on Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Runoff Losses from Rice Fields in Hai River Basin, China

CHEN Ying¹, ZHAO Lei¹, YANG Yong¹, SUN Chun-yuan², ZHANG Xiao-lan³

(1.Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China; 2.Tianjin Ninghe Agricultural Bureau, Tianjin 301500, China; 3.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Runoff is one of the major mechanisms for nutrient loss from crops. However, it has been studied less in North China than in South China where there is much more runoff. Therefore, to better understand the loss of nitrogen(N) and phosphorus(P) in runoff, we studied runoff from paddy rice in a typical agricultural county in the Hai River basin. Using event monitoring in the field, we studied the characteristics of runoff losses under natural rainfall conditions. N losses were $4.77\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and its loss rate was 0.7% of applied fertilizer. P losses were $2.08\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and its loss rate was 0.6% of applied fertilizer. As expected N losses were positively co-related to amount of runoff and mainly consisted of particulate nitrogen. P losses were affected by amount of fertilizer applied and runoff, however due to its complexity(of P), the influence had to be further studied. Due to rainfall scarcity in North China area, runoff loss was not the primary problem for nutrient losses from paddy rice in the Hai River basin.

Keywords: Hai River basin; paddy rice; runoff; N and P loss

随着我国粮食产量快速增长,农民对化肥的依赖与日俱增。而我国化肥利用率普遍较低,化肥中未被作物吸收的氮磷营养成分高达60%~70%^[1-2]。这部分营养成分在降雨和灌溉的作用下,主要以地表径流和地下淋溶两种方式进入水环境,构成对水体水质的潜在威胁^[3]。随着对农业非点源污染研究的开展,因化肥

过量施用而导致的氮磷养分流失已经成为我国农业非点源公认的重要污染源之一^[4-5],受到高度关注。

受地形土壤、气候降雨、作物类型、耕作及灌溉方式等因素影响,不同地区化肥流失数值区别较大^[6],一般选取某流域内典型区域中的代表作物为研究对象,采取人工降雨建立模型或自然降雨田间实测的方法分别对地表径流和地下淋溶进行研究^[7-8]。我国北方地区因干旱少雨,文献中多以旱田的地下淋溶为研究对象,而对农田地表径流研究较少。为此本文选取海河流域农田地表径流为研究目标,并采用更为贴近实际的自然降雨田间实测方法研究化肥流失率,为今后北

收稿日期:2010-08-13

基金项目:全球环境基金(GEF)海河流域水资源与水环境综合管理项目(SEPA-ZWN-3, C/II/S/09/090)

作者简介:陈颖(1982—),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为城市与农村非点源污染防治。E-mail:chenying_taes@126.com

方其他地区农田地表径流流失特征的研究提供宝贵的第一手资料。此外,根据调查结果,由于水稻的施肥量和耗水量均较高^[9-10],其地表径流流失特征也最为明显,因而选取水稻田的氮磷流失特征为研究对象,为海河流域农田化肥流失量估算提供参考与数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于天津市宁河县芦台镇薄前村宁河县农业局设施农业示范水稻基地,北纬 39°20′03.5″,东经 117°46′26.5″,属暖温带、半湿润大陆性季风气候,降雨集中在 6—8 月,年平均降雨量为 560 mm。试验区地形平坦开阔,地势低洼,海拔(黄海)高度为-1 m,土地平整,土壤属性为粘质重碳酸盐盐化水稻土,其土壤理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计及实施

试验区设常规施肥(F)和不施肥(N)2 个样本,3 次重复,共 6 个小区(见图 1),各小区均为 4 m×6 m 的长方形。为防止小区之间、小区和周边地块之间的串水现象,采用水泥墙体相互隔开,并在示范区四周设置宽度不少于 2 m 的稻田保护行。

每个小区排水均对应一个径流池,用来收集小区径流水(见图 2)。径流池的规格为 2 m×1 m×1.2 m,地下高度为 1 m。径流池排水口 1 设计为在水稻生长期收集径流水用,其高度与当地水稻田埂的排水高度一致,高出地面 8 cm;排水口 2 则设计用于水稻晒田期排水用,高度与地面保持一致。径流池表面铺设石棉盖板防止雨水、灰尘等杂物进入。此外,在径流池外侧设置抽排池以便储存、抽排各试验阶段径流池中的径流水,其规格为 2 m×1 m×1.4 m,地下高度为 1.2 m。

试验区统一种植津川一号水稻,常规施肥区的肥料、农药施用量、施用方法和施用时期完全遵照当地测土施肥后用量及农民生产习惯;不施肥区不施用化肥,但为了防止受病虫害的侵袭导致试验终止,施用少量低毒、易降解的农药,试验区化肥农药施用量见表 2。水稻田水深度在 5 cm 左右,并根据水稻生长的

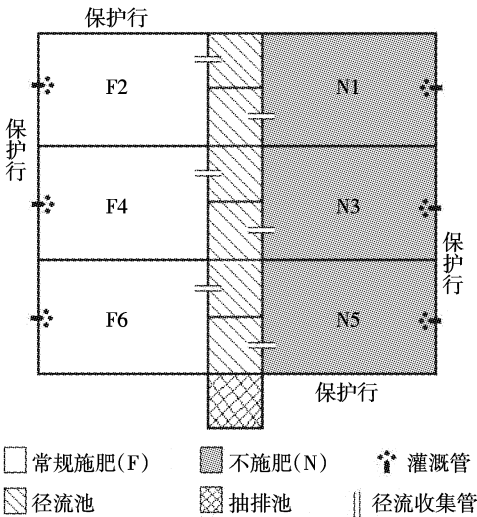


图 1 地表径流试验区位置图

Figure 1 Runoff testing field design

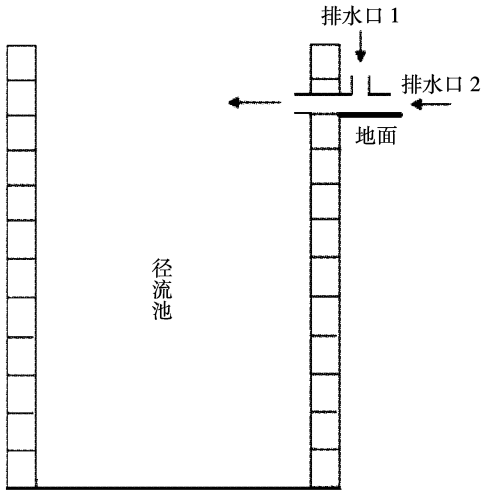


图 2 径流池设计图

Figure 2 Runoff basin design

不同时期略有变化。

1.3 样品采集与测定

试验内容主要包括土壤样本采集、降水量监测、径流水样本的采集和水量记录、采集样本送检及样本结果分析等。土壤样本采集包括基础土样采集和试验后土样采集,在试验周期内监测每次降雨雨量,雨量器固定设置在试验区临近的农业局设施农业示范培

表 1 土壤理化性质

Table 1 Pysical and chemical properties of soil

采样深度/cm	含水量/%	硝态氮/mg·kg ⁻¹	铵态氮/mg·kg ⁻¹	全氮/%	有效磷/mg·kg ⁻¹	全磷/%	有效钾/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	pH
0~20	26.16	1.99	9.09	0.11	19.63	0.76	328.66	17.46	8.42
20~40	23.32	2.63	8.05	0	14.68	0	243.33	0	8.71

表 2 试验区化肥农药施用量(kg·hm⁻²)
Table 2 Amount of fertilizer and pesticide of testing field(kg·hm⁻²)

项目	不施肥	常规施肥
化肥	—	磷酸二铵 187.5;磷酸—铵 75; 尿素 397.5;锌肥 37.5
农药	阿维菌素:0.72; 毒霸:0.72	丁草胺(高毒)2.7;稻乐丰 2.1;啉虫咪 2.1; 啄螟 7.2;阿维菌素 1.1;三环唑 2.7;毒霸 1.47; 纹曲净 2.4;吡虫啉(高毒)0.48

训中心院内。径流水样本的采集和水量记录同步完成,且取决于降雨强度,单次降雨形成径流则立即采样,若多次降雨才形成径流则取混合样,试验周期内共采集 5 次径流水样本。每次完成径流样本采集与水量记录后,将各径流池内径流水排至抽排池一并清空。试验区土壤样本、径流水样都按照采样规定采集,保存并送至专业化验室进行化验。试验日程见表 3。

1.4 试验数据处理

单块小区 N、P 元素径流流失量的计算:

$$P=\sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

式中:P 为污染物流失量;

C_i 为第 i 次径流(或淋溶)水中氮、磷的浓度;

V_i 为第 i 次径流(或淋溶)水的体积。

试验区肥料流失率的计算以氮素为例,其流失率计算公式如下:

氮流失率=(常规施肥区氮素流失量平均值-不施肥区氮素流失量平均值)/氮素施用量

磷素的流失率与氮素流失率计算相同。试验数据均采用 Excel2003 处理。

2 结果与分析

2.1 降雨与产流量

试验周期内共降雨 14 次,其中插秧前降雨 6 次,采集径流样本 1 次,其余降雨和径流样本采集均发生在水稻生长期。根据插秧前观察降雨与径流产生的关系,发现当单次降雨超过 12 mm 便会产生径流;而在插秧后且及时灌溉的情况下,单次降雨超过 10 mm 即会产生径流。且随雨量增大,径流量也增加。降雨与产流量关系如图 3 所示。

2.2 氮磷元素流失量

根据径流化验浓度与径流量测量数据计算出试验区氮磷元素的流失量,如表 4 所示。为便于计算与分析,径流量采用 6 块小区的径流量平均值,不施肥

表 3 试验日程
Table 3 Testing schedule

日期(月-日)	试验内容
04-10	降雨 01:3.6 mm
04-20	降雨 02:5.2 mm
04-23	降雨 03:12.1 mm
04-25	土壤采集 01;径流采集 01:85.6 L
05-04	降雨 04:4.7 mm
05-15	降雨 05:14.7 mm
05-19	降雨 06:3.4 mm
06-09	施底肥:磷酸二铵 187.5 kg·hm ⁻² 、尿素 75 kg·hm ⁻²
06-10	插秧:行距 29.7 cm,株距 16.5 cm
06-20	追肥 01:尿素 75 kg·hm ⁻² 、锌肥 37.5 kg·hm ⁻² 、 磷酸—铵 75 kg·hm ⁻²
06-23	降雨 07:16.5 mm
06-25	降雨 08:35.5 mm
06-28	追肥 02:尿素 75 kg·hm ⁻²
06-30 至 07-01	降雨 09:52.5 mm
07-02	径流采集 02:1 870.67 L
07-04 至 07-05	降雨 10:42 mm
07-10	降雨 11:3.1 mm
07-11	追肥 03:尿素 112.5 kg·hm ⁻² ;径流采集 03:585.33 L
07-14	降雨 12:30 mm
07-17	径流采集 04:902.67 L
07-26	追肥 04:尿素 60 kg·hm ⁻²
08-10 至 08-12	降雨 13:80 mm
08-17	降雨 14:9.5 mm
08-18	径流采集 05:1 758.67 L
10-10	作物取样;收割
10-13	土壤采集 02

表 4 氮磷元素流失量(mg)
Table 4 N and P losses by runoff(mg)

采样次数	不施肥区		施肥区	
	总氮流失量	总磷流失量	总氮流失量	总磷流失量
1	248.27	1.74	180	1.23
2	6 737.73	479.85	8 130	742.96
3	899.27	110.76	1 440	338.35
4	1 170.09	59.72	1 790	504.24
5	6 384.65	126.27	6 980	185.49

区的总氮、总磷流失量为不施肥区 3 个小区的总氮、总磷流失量平均值,施肥区的数据也为施肥区 3 个小区的总氮、总磷流失量平均值。

(1)氮素流失量与径流量、化肥施用量的关系

如图 4 所示,对比在水稻生长期间的 4 次径流采集化验数据和降雨径流量数据可见,虽然施用化肥区的氮素流失量大于未施化肥的氮素流失量,但不施肥

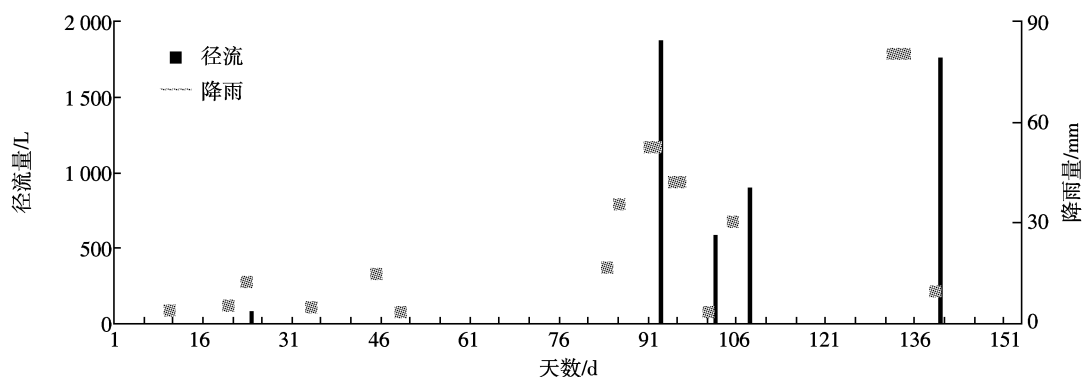


图3 降雨与产流量的关系

Table 3 The relationship between amount of rainfall and runoff

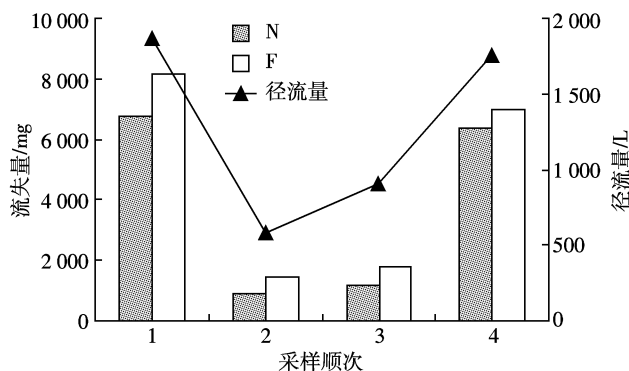


图4 氮流失与径流量的关系

Table 4 The relationship between amount of N runoff losses and runoff

区的氮素流失量仍维持在较高水平,且试验区的氮素流失量随径流量的变化而变化,这与其他学者的研究结果相一致^[1]。

再由图5所示,对比在水稻生长期施肥区每次径流采样前施用的氮肥量和径流量对氮素流失量的影响,可见氮素流失量与施肥量有关,但考虑到施肥

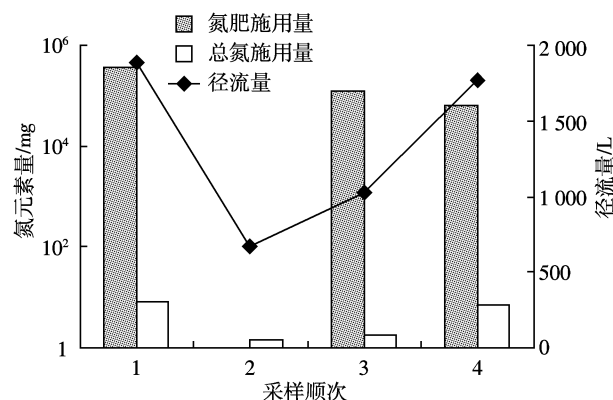


图5 施肥区氮流失与施肥量及径流量的关系

Table 5 The relationship among the amount of N runoff losses(F), fertilizing and runoff

与降雨径流形成的时间差距和降雨量大小等其他因素的干扰,其正向相关度并不显著。而施肥区氮素流失量则与径流量呈现明显正向相关趋势^[11-12]。

(2) 磷素流失量与径流量、化肥施用量的关系

如图6所示,对比在水稻生长期期间的4次径流采集化验数据和降雨径流量数据可见施用化肥区的磷素流失量虽大于未施化肥的磷素流失量,但在多次降雨径流情况下两者之间磷素差值未体现出规律性变化,且试验区的磷素流失量随径流量及化肥施用量的变化趋势并不明显(图7)。

2.3 氮磷元素流失率

将水稻生长期施肥与不施肥区的氮磷元素流失量差值与周期内氮磷化肥施用量相比得出氮磷元素的流失率,分别为0.7%和0.6%,流失负荷为4.77 kg·hm⁻²和2.08 kg·hm⁻²,如表5所示。

2.4 农药流失量

通过多次对径流水样本和土壤样本中高毒农药的试验室分析,结果显示丁草胺和吡虫啉在径流水及

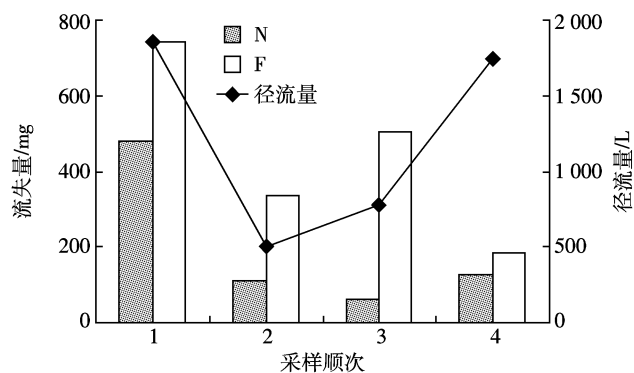


图6 磷流失与径流量的关系

Table 6 The relationship between amount of P runoff losses and runoff

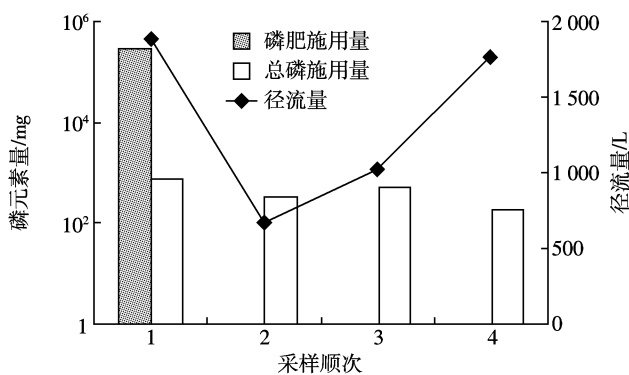


图 7 施肥区磷流失与施肥量及径流量的关系

Table 7 The relationship among the amount of P runoff losses (F), fertilizing and runoff

表 5 氮磷流失率		
Table 5 Runoff rate of N and P		
项目	N	P
施用量/kg	1.63	0.83
流失量/g	11.45	4.98
流失率/%	0.7	0.6
流失负荷/kg·hm ⁻²	4.77	2.08

浅层土壤中均未有农药残留。可见少量的高毒农药施用对地表水体及浅耕土壤并无污染,但对于地下水、深耕层土壤的污染则有待进一步研究。

3 讨论

3.1 氮磷元素流失来源

由图 4 可知,未施肥区的氮素流失也处于较高水平,且与施肥区的氮素流失相差并不大。这可能是由于在降雨后试验区表层土壤与雨水径流相互作用的结果,土壤中的有机态氮进入水溶液形成溶解态氮,从而与侵蚀泥沙相结合形成颗粒态氮,并成为农田地表径流中氮素的主要形态^[11,13-14]。对比原始土样与收获后土壤的养分含量也可以发现氮素的养分含量的确有所降低,如表 6 所示。

而磷素的流失机理较氮素更为复杂。虽然施肥区磷素流失量与磷肥施用量有一定关联^[15],但影响特征尚不明确。又根据已知试验数据可推出未施肥区磷素流失可能是由于雨水侵蚀地面,泥沙附着磷素形成颗粒态磷进入径流而形成的^[8,16]。因此,农田地表径流中磷素由可溶性磷和颗粒态磷共同构成,其主要形态尚需通过更为深入的试验研究确定^[14-15]。

3.2 氮磷元素流失率影响因素

由试验结果可知海河流域水稻田氮磷元素径流

表 6 土壤养分含量对比			
Table 6 Comparison of soil nutrient content			
土壤样本	硝态氮/mg·kg ⁻¹	铵态氮/mg·kg ⁻¹	总氮/%
原始土样	1.99	9.09	0.11
收获后	不施肥区	1.38	3.06
	施肥区	1.53	3.67
			0.103

流失并不严重,这是由以下几方面原因形成的。首先,由于北方干旱的气候导致降雨并不频繁且雨量偏少,因此径流产生量也较小。其次,化肥的施用量为根据当地土壤养分情况调查结果,进行测土配方后的用量,已属于科学施肥,用量较为合理且化肥利用率较高。第三,由于北方降雨较少且强度不够,施肥后未被作物及时吸收的氮磷营养成分随灌溉水及雨水或贮存于土壤中或经由地下淋溶流失,地表径流流失并非北方水稻田氮磷养分流失的首要途径,这一点在旱田养分流失中更为突出^[3,17]。第四,地形原因,研究地所处为平原地带,较坡地的径流产生量小,这也是造成试验氮磷元素径流流失较小的又一原因。

4 结论

基于自然降雨田间实测方法得出水稻田地表径流流失特征,氮素流失率为 0.7%,流失负荷为 4.77 kg·hm⁻²。氮素流失量与径流量成明显正向相关,并以颗粒性氮为径流流失的主要形式。磷素流失率为 0.6%,流失负荷为 2.08 kg·hm⁻²。磷素流失量与径流量和磷肥施用有关,但规律尚不明确,需另立专题进行深入研究。进而推断出在北方干旱少雨的气候影响下,地表径流并非农田种植作物氮磷元素流失的首要途径。此外,课题组还分析了试验区农药流失量。结果显示丁草胺和吡虫啉这两种高毒农药在径流水及浅层土壤中均未有农药残留。而产量方面在化肥农药的双重作用下,施肥区水稻产量约为不施肥区水稻产量的 3 倍。故考虑到作物经济效益与环境效益,课题组应进一步研究化肥、农药施用量的平衡点。

参考文献:

[1] 崔 键,马友华,赵艳萍,等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-340.
CUI Jian, MA You-hua, ZHAO Yan-ping, et al. Characteristic and countermeasures for control and prevention of multiple area-pollution in agriculture [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(1): 335-340.

- [2] 胡宏祥, 洪天求, 马友华. 农业非点源污染及其防治策略研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 315-317.
HU Hong-xiang, HONG Tian-qiu, MA You-hua. Agricultural non-point source pollution and its tactics of preventing and curing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(4): 315-317.
- [3] 谢红梅, 朱波. 农田非点源氮污染研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 349-352.
XIE Hong-mei, ZHU Bo. Research progress on non-point source pollution of nitrogen in agro-ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3): 349-352.
- [4] 朱兆良, 孙波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护, 2008, 394: 4-6.
ZHU Zhao-liang, SUN Bo. Control measures of China agricultural non-point source pollution[J]. *Environmental Protection*, 2008, 394: 4-6.
- [5] 林超文, 庞良玉. 施肥对我国农业面源污染的影响与对策建议[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17668-17670.
LIN Chao-wen, PANG Liang-yu. Effects of fertilization on the agricultural non-point pollution in China and some relevant countermeasures and suggestions[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(35): 17668-17670.
- [6] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 基于农业工程技术的农业非点源污染防治技术体系研究[J]. 农机化研究, 2008, 9: 1-4.
GUO Hong-peng, ZHU Jing-ya, YANG Yin-sheng. Research advances and prospects of mining mechanical harvesting parts[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008, 9: 1-4.
- [7] 焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 施肥与作物类型对旱作农田氮磷径流流失的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 614-617.
JIAO Jin-ping, XU Di, WANG Shao-li, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland in relation to fertilization and crop types[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(5): 614-617.
- [8] 张威, 艾绍英, 姚建武, 等. 水稻田磷径流流失特征初步研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 237-243.
ZHANG Wei, AI Shao-ying, YAO Jian-wu, et al. Preliminary study on characteristics of phosphorus losses from rice fields[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(16): 237-243.
- [9] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2008: 64-72.
YAN Xiang. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition in China[D]. Beijing: Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008: 64-72.
- [10] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guang-heng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 6-12.
- [11] 黄满湘, 章申, 唐以剑, 等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 6-10.
HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, TANG Yi-jian, et al. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1): 6-10.
- [12] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 农田土壤氮素径流损失的影响因素及其防治措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 64-67.
ZUO Hai-jun, ZHANG Qi, XU Li-gang, et al. Influencing factors of nitrogen runoff loss from farmland soil and its prevention measures[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 64-67.
- [13] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 147-154.
HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang, et al. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 147-154.
- [14] 焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 534-540.
JIAO Ping-jin, XU Di, WANG Shao-li, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 534-540.
- [15] 盛海君, 夏小燕, 杨丽琴, 等. 施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2837-2840.
SHENG Hai-jun, XIA Xiao-yan, YANG Li-qin, et al. Effects of phosphorus application on soil available P and different P from in runoff[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2837-2840.
- [16] 陈皓, 章申. 黄土地区氮磷流失的模拟研究[J]. 地理科学, 1991, 11(2): 142-148.
CHEN Hao, ZHANG Shen. Nitrogen and phosphorus movement from loess tillage under modelling the rainfall-runoff erosion processes[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, 11(2): 142-148.
- [17] 任丽萍, 宋玉芳, 许华夏, 等. 旱田养分淋溶规律及对地下水影响的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 133-136.
REN Li-ping, SONG Yu-fang, XU Hua-xia, et al. Eluviation of nutrients in glebe-soil and its influence on groundwater[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(3): 133-136.