

水稻田面水中氮磷素的动态特征研究

金洁¹, 杨京平¹, 施洪鑫², 陈俊², 郑洪福²

(1. 浙江大学生命科学学院生态研究所, 浙江 杭州 310029; 2. 杭州市余杭区农科所, 浙江 杭州 310013)

摘要:采用独立排灌系统的田间试验研究了水稻田面氮素、磷素的动态特征。结果表明,分次施肥后的次日,田面水中氨氮、总氮浓度明显升高,随着时间的推移,氮素浓度下降很快。特别是第1次施氮后第9 d,各处理氨氮浓度分别为施后第1 d浓度的1.19%~2.70%,全氮则变为6.03%~18.74%(对照N-1除外)。氨态氮/全氮比值也呈类似趋势,相比较而言,硝态氮含量要远远低于氨氮,最大值为2.07 mg·L⁻¹。同时还表现出不同的趋势,其峰值在第3 d出现。另外,不同的施氮量的作用下,等量的磷肥所产生的田面效应表现不同,且大表现为施氮量多者,田面水磷含量也相应多的现象。从环境污染角度考虑,控制氮素、磷素田面流失主要时期为施肥后1周内。

关键词:稻田; 氮素; 磷素; 流失; 动态特征

中图分类号:S131.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)02-0357-05

Variations of Nitrogen and Phosphorus in Surface Water Body of a Paddy Field

JIN Jie¹, YANG Jing-ping¹, SHI Hong-xin², CHEN Jun², ZHENG Hong-fu²

(1. Ecological Institute of Life Science College Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Agriculture Science Institute of Yuhang District, Hangzhou City, Hangzhou 310013, China)

Abstract: A field experiment with independent irrigation system was conducted to elucidate the dynamic characteristics of nitrogen (N) and phosphorus (P) in surface water of paddy field under different N supply levels in 2003. The results of field experiments showed that split nitrogen fertilizer application with 4 times greatly increased the concentration of ammonia nitrogen (NH₄⁺ - N) and total nitrogen (TN) in surface water at field initially, then both declined subsequently as the time passed. After the first nitrogen application, the concentrations of NH₄⁺ - N and TN at 9th day for 6 different treatments were separately in ranges of 1.19% ~ 2.70%, and 6.03% ~ 18.74% (except CK) at first day. The rate of NH₄⁺ - N/TN had the similar trend as TN, NH₄⁺ - N. But the concentration of nitrate nitrogen (NO₃⁻ - N) was lower than the one of and the maximum concentration was 2.07 mg·L⁻¹. It also showed different trends from TN and NH₄⁺ - N and the peak concentration value appeared after 3 days urea employed each time. The same amount of phosphorus application in different nitrogen application treatments showed different results that phosphorus concentration in the surface water. The P concentration in surface water of paddy had some relationships to nitrogen application amounts. More N application amount produced more P content in surface water of paddy field. In terms of the environment consideration, the period within a week after the fertilizer application was a critical time to control N, P loss and leaching from flooded paddy field.

Keywords: paddy field; nitrogen; phosphorus; runoff

水体生态环境的恶化很大程度上归因于农业面源氮、磷等营养型污染物^[1,2]。当水体中的营养水平很高时,藻类会大量生长,水中溶解氧降低,破坏水体生态系统的平衡,使鱼类死亡;产生的有毒微生物增加,降低河湖的利用价值。其中农田径流、水土流失等导

致的水体污染最为重要且分布最为广泛^[3]。国内外在农田土壤氮磷素方面研究较多,相比之下对于施肥后水稻田面水体中的氮,磷素动态行为进行探讨较少,而恰恰该方面的研究能为土壤氮、磷资源保护,控制径流氮、磷流失对受纳水体的污染提供科学依据。农田生态系统中,氮、磷肥施用对水质造成影响最有可能发生在高产田,因此,本研究选择地处杭嘉湖平原的余杭稻区,通过大田试验获得水稻田面水中氮磷素的

收稿日期: 2004-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(60274052)

作者简介: 金洁(1980—),女,硕士研究生,主要研究方向为生态工程和 水体污染。E-mail: jinjie9830@163.com

动态特征。

1 材料与方法

1.1 大田试验设计

试验位于浙江杭州余杭区农科所试验站。供试土壤为青紫泥,系发育于湖沼相淤积物,为浙北稻区优势性土种。据近年来的产量数据表明在无肥区单季粮食产量均高于 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,充分说明该区的土壤是高肥力土壤。土体结构为 A-P-W-G_w。其中耕作层 A 为 0.18 m,犁底层 P 为 0.03 m,潜育层 W 为 0.23 m,潜育层以下为潜育层 G_w。耕作层中的有机质含量为 2.60%,全氮为 0.176%,全磷为 0.091%。

供试品种为单季水稻丙 9652。共计 20 个试验小区 ($3.6\text{ m}\times 5\text{ m}$) 呈 2 行对称排列,试验 2 端设有非试验保护区(面积约为 270 m^2)。小区田埂筑高 0.2 m,并用塑料薄膜包被,以减少侧渗和串流。设立独立的单排单灌的排灌系统,灌溉水为当地的小运河水。本试验中,水稻整个生长期处于“非完全淹水”状态,即在施肥和治虫害时,小区进水,其余时间不进水,也不排水,保持田面原有水深让其自然淋失和蒸发。所以在施肥后半个月内田面有水,后期没水。

1.2 氮肥施用方案设计

该试验设 5 个处理,供试氮肥为尿素,见表 1。施肥方式:基肥时,氮肥及各小区过磷酸钙 0.81 kg 施入田面,随即用田耙与耕层土壤人工拌匀;分次追肥时,在田面进水达 5cm 水层后表施,另外在施保蘖促花肥和粒肥时,分别加施氯化钾 0.27 kg 和 0.14 kg 。

表 1 各小区施氮方案表

Table 1 Fertilization schedule for the various plots studied

处理	氮肥量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	小区施氮量(尿素)/ kg
N-I	0	0
N-II	75	$0.30^*(0.15^{\text{①}}+0.07^{\text{②}}+0.06^{\text{③}}+0.02^{\text{④}})$
N-III	150	$0.60^*(0.30^{\text{①}}+0.13^{\text{②}}+0.12^{\text{③}}+0.05^{\text{④}})$
N-IV	225	$0.90^*(0.45^{\text{①}}+0.20^{\text{②}}+0.18^{\text{③}}+0.07^{\text{④}})$
N-V	300	$1.20^*(0.60^{\text{①}}+0.27^{\text{②}}+0.24^{\text{③}}+0.09^{\text{④}})$
N-VI	375	$1.50^*(0.75^{\text{①}}+0.33^{\text{②}}+0.30^{\text{③}}+0.12^{\text{④}})$

注:其中“*”表示施尿素总量,“①”为基肥,施肥时间为 2003 年 7 月 12 日;“②”为蘖肥,施肥时间为 7 月 22 日;“③”为保蘖促花肥,施肥时间为 8 月 19 日;“④”为粒肥,施肥时间为 9 月 12 日。

1.3 水样采集和测定方法

田间试验工作自 2003 年 7 月 12 日水稻移栽开始,一直到收割为止。在水稻生长期进行定期取样,采样时间为每次施肥后的第 1、3、5、7、9 d,取样时,采用 100 mL 医用注射器,不扰动土层小心抽取 6 处田

面水,注入塑料瓶中。

水样中硝态氮测定采用紫外分光光度法,铵态氮测定运用靛酚蓝比色法,全氮测定先经过硫酸钾于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 高温消煮 30 min,经预处理后将全氮转为硝态氮,其余同硝态氮分析。

2 结果与讨论

2.1 田面水中氮素浓度动态变化

分 4 次施尿素田面水氮素的动态变化结果见图 1。第 1 次施氮后,田面水中氨氮(NH_4^+-N)浓度、全氮(TN)浓度迅速提高,而且随着施氮量的增加而增加,随着时间的推移两者的浓度都呈下降趋势。1 周过后,6 种氮处理氨氮浓度分别为施后 1 d 时的 1.19%~2.70%,全氮则变为 6.03%~18.74% (对照 N-I 除外)。相比较而言,硝态氮(NO_3^--N)含量要远远低于氨氮,最大值为 $2.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其峰值并未在施后第 1 d 出现,而在第 3 d 出现。这种变化可以理解为,在施氮前,田面水中的硝态氮含量本来很少,施氮后尿素首先转化为氨氮,然后经过硝化作用逐渐转化成硝态氮。由于稻田系统采用间歇进水,不断补氧,更有利于硝化作用的进行,在第 3 d 达到最大,随着氨氮和全氮含量的迅速下降,硝态氮也随之下降。

上述田面氮素浓度随时间动态下降的特征,这可能主要由于试验时温度和风等环境条件促使氨挥发作用强烈,消耗损失大量的氨态氮的缘故。虽然氨挥发过程十分复杂,且受许多因素的影响,在自然条件下估算其损失非常困难,但是可以肯定氨挥发是稻田氮素损失的主要途径之一。特别是 2003 年 7、8 月份表现历年少有的高温少雨天气,对氨挥发创造了很好的条件。此外,还可能与水稻生长吸收氮素,以及水稻土壤施尿素随着时间推移硝态氮渗漏逐渐增加有关^[4],这在旱作土壤中氮肥施用也有类似规律^[5]。

后 3 次追肥引起田面水氮素动态变化与第一次施氮后的表现相似,随着所施氮量的减少,田面水体的氮素含量也相应地降低。可以推测,施氮能够明显提升田面水中的氮素浓度,特别是氨氮浓度,但是另外一点在施氮过程中不发生径流流失的话,经过一周左右,田面的氮素浓度可以大幅度地下降,这明显减少了氮素流失的潜在风险。同时也说明在施肥后一周内为防止氮素大量流失的关键时期。

鉴于田面水氮素含量与施肥量之间存在密切关系,故对施氮后田面水氮素浓度与累计施氮水平进行相关分析,见表 1。每次施氮后所取水样氮素浓度均

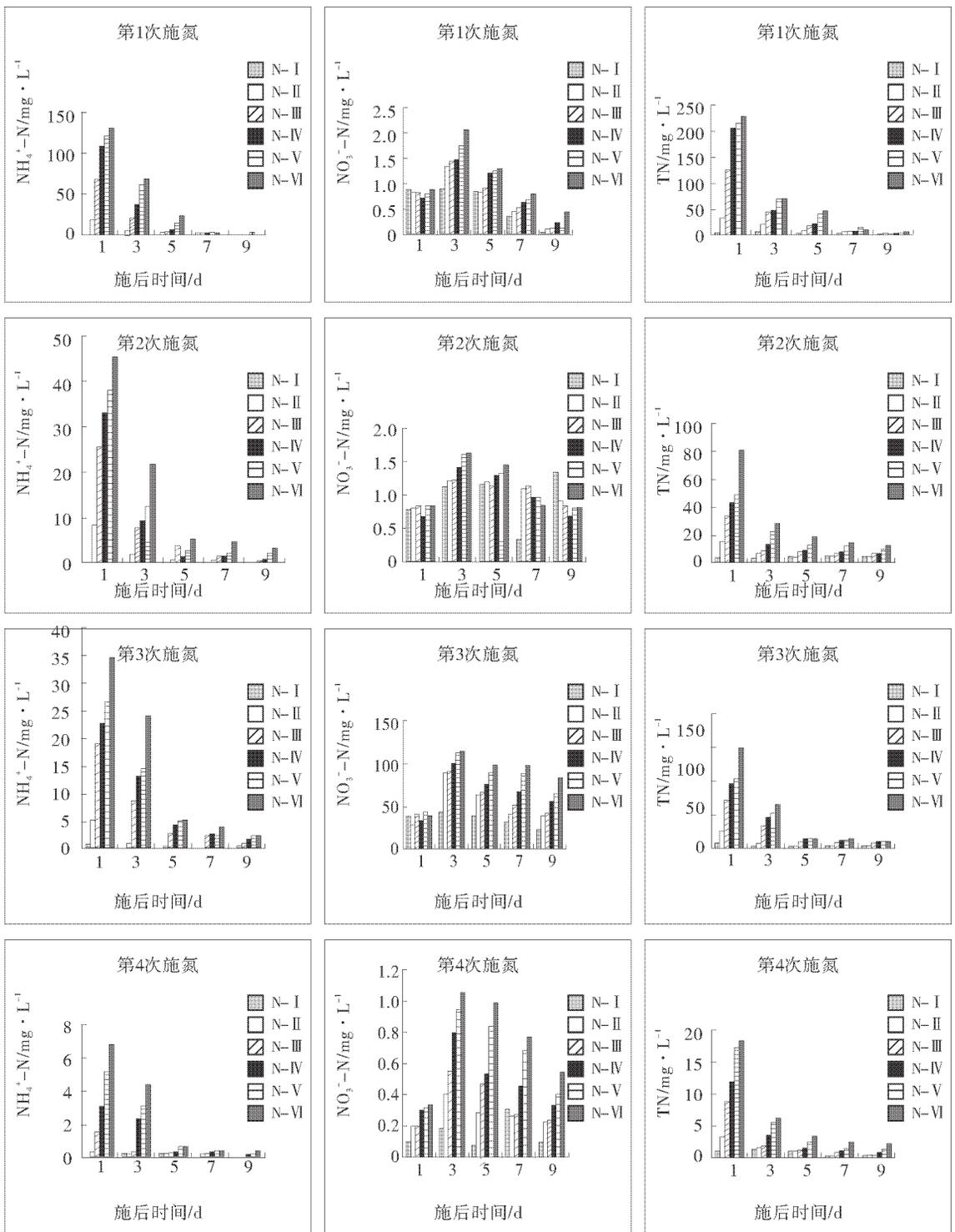


图1 分四次施氮后田面水中氮素的动态变化

Figure 1 Nitrogen concentrations in the field surface water after urea application within four times

值同相应的施氮量达到了极显著的水平。表明施氮能显著提升田面水中氮素含量尤其是氨氮含量。

2.2 田面水中氨氮/总氮的动态变化

氨态氮是尿素施入田面后各种形态氮素数量与周转的关键物质,通过氨氮与总氮比值可以反映氮素

转化与流失的相对水平。由表2可知,在前2次施氮中,约在施后1~3d之内,田面水中氨氮/总氮达到所有动态观测期中的最大值,为0.93。此后比值呈不断下降趋势,在后2次施氮中,出现最大值的时间推后约3~5d左右,之后也不断回落。从总体趋势来

表 1 田面水氮素浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与施氮水平(kg)的直线相关分析Table 1 The linear relation between nitrogen concentrations($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)in field surface water and the N fertilizer application(kg)

施氮	总氮浓度			氨氮浓度		
	斜率/ <i>K</i>	截距/ <i>b</i>	相关系数/ <i>r</i>	斜率/ <i>K</i>	截距/ <i>b</i>	相关系数/ <i>r</i>
第 1 次	102.448	5.486	0.979**	65.643	-1.267	0.989**
第 2 次	77.129	2.012	0.981**	46.606	0.006	0.983**
第 3 次	66.242	0.774	0.986**	46.050	-0.012	0.984**
第 4 次	51.571	0.397	0.988**	21.951	-0.260	0.967**

表 2 分四次施氮后田面水中氨氮/总氮的动态变化

Table 2 The dynamic ratios of $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ in field surface water after urea application within four times

处理	第 1 次施后时间/d					第 2 次施后时间/d					第 3 次施后时间/d					第 4 次施后时间/d				
	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9
N - I	0.00	0.02	0.02	0.02	0.07	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.52	0.01	0.15	0.08	0.22	0.06	0.09	0.08	0.10	0.08
N - II	0.46	0.26	0.16	0.06	0.07	0.55	0.32	0.20	0.06	0.04	0.55	0.44	0.22	0.11	0.35	0.07	0.07	0.09	0.18	0.08
N - III	0.52	0.47	0.23	0.12	0.36	0.77	0.92	0.52	0.21	0.11	0.65	0.81	0.76	0.72	0.38	0.16	0.18	0.13	0.11	0.09
N - IV	0.52	0.74	0.38	0.10	0.21	0.76	0.72	0.16	0.12	0.13	0.58	0.73	0.80	0.65	0.56	0.25	0.66	0.22	0.25	0.12
N - V	0.57	0.86	0.36	0.12	0.21	0.78	0.55	0.20	0.20	0.21	0.65	0.70	0.87	0.51	0.65	0.30	0.54	0.25	0.24	0.09
N - VI	0.57	0.93	0.47	0.20	0.19	0.56	0.79	0.31	0.34	0.29	0.58	0.90	0.81	0.64	0.62	0.37	0.71	0.19	0.15	0.16

看, 田面水氮素流失主要以氨氮的形态为主, 经历 1 个峰值后随时间推移不断下降。另外从所有比值的均值看, $\text{N - I}(8\%) < \text{N - II}(22\%) < \text{N - III}(41\%) < \text{N - IV}(43\%) < \text{N - V}(44\%) < \text{N - VI}(49\%)$, 再次反映了施氮能明显提高氨氮占全氮的比重, 而且是随施氮量的增加而增加的。

2.3 田面水中磷素浓度的动态变化

如图 2 所示, 在基施磷肥后的次日(7 月 12 日), 田面水的磷素浓度出现一峰值, 总磷水平分别为 0.70、0.43、0.87、0.73、1.21、1.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而后迅速下降。这可用“土壤对磷素的吸附, 反而使田间磷素

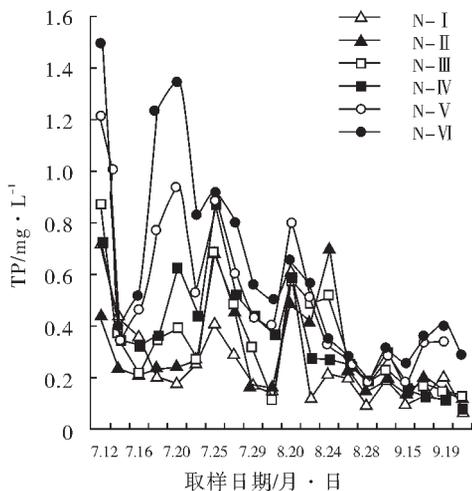


图 2 试验期间田面水中 TP 浓度动态变化

Figure 2 The dynamic cure of phosphorous in the field surface water within the full time of test

净化^[6]加以解释。此外, 还发现在不同的施氮量的作用下, 等量的磷肥所产生的田面效应表现不同, 施氮量多者, 田面水磷含量也相应多的现象。这点在水稻整个生长期, 田面水磷素均值大小顺序排列中更为突出: $\text{N - I}(0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}) < \text{N - II}(0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}) < \text{N - III}(0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}) < \text{N - IV}(0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}) < \text{N - V}(0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}) < \text{N - VI}(0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。对于后面出现的磷素浓度的波动, 可理解为: 几次的追肥过程会扰动表土层, 一定程度上能释放土壤中的磷, 使田面水磷浓度有明显地回升。同时受雨季的影响, 各处理水样总磷浓度有一定幅度的波动。当水稻进入生长旺盛期, 对土壤中磷的吸收也在逐渐增加, 释放到田面的磷素就减少。而到水稻生长中后期, 田面水中的磷反而被田间土壤吸收。所有处理水样磷浓度变幅较小, 逐渐趋于稳定, 除 N - VI 外, 其余处理均达到最低水平。

据 Sharpley 等^[7]人在总结农业磷素与水体保护时强调指出, 尽管当季磷肥的流失量通常不超过 5%。但对水体富营养化具有关键性的作用。因此, 控制磷素的流失就能有效地抑制水体富营养化。而由于地表径流的磷素流失不仅与施磷水平、施磷时间有关, 且和施磷与径流发生之间的时间间隔有关^[8]。从本试验结果来看, 施磷或土层被拨动后 1 周内是控制磷素流失的主要环节, 同时在此期间, 应避免农田排水和防止因降雨引起的田面水外溢。另外, 试验所在的地区施磷时期恰好与降水集中的雨季相吻合, 从最

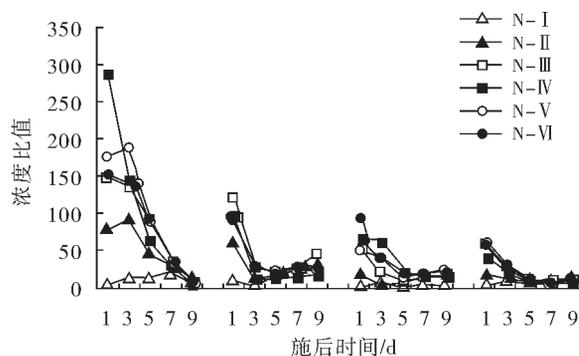


图 3 田面水中 TN/TP 动态变化

Figure 3 The dynamic curve of TP/TN in the field tested

佳田间磷素管理考虑, 结合磷肥的后效, 施磷季节可调整到冬作。

2.4 田面水中全氮/全磷的动态变化

氮和磷通常是水体中植物生长的制约因子, 国际上, 一般认为总磷浓度为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是湖泊富营养化的发生浓度。磷是水体产生富营养化的限制因素^[9, 10], 如果磷素未达到一定含量, 仅有氮、碳等元素不会引起水体富营养化^[10]。因此从水体富营养化角度看, 考核全氮/全磷动态变化有一定的意义。从图 3 所示, 全氮/全磷在四次施氮过程大体上在第 1 d 达到最大值 (除了 N-I 处理变化平缓外), 此后逐渐下降。其间起主要作用的往往在于总氮的含量, 通常它的下降幅度要比总磷大得多。不同处理间全氮/全磷规律性不强, 这可能跟施氮肥可以激发作物对磷素的吸收有关。

3 结论

(1) 施肥后 1 周内为防止氮、磷素大量流失的关键时期。

(2) 施氮能显著提升田面水中氮素含量, 尤其是氨氮含量以及氨氮占全氮的比重, 而且是随施氮量的

增加而增加的。

(3) 从环境污染角度来讲, 有必要进一步探讨在人为控制条件下, 研究 TN/TP 浓度变化, 实现氮磷流失最小化, 提出适宜当地水稻施肥的最佳方案。

参考文献:

- [1] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Application*, 1998, 8 (3): 559 - 568.
- [2] Gouling K W T, Matchett L S, Heckrath G, et al. Nitrogen and phosphorus flows from agricultural hillslopes[M]. *Advance in Hillslope Processes*, Volume 1, Edited by Auderson M G and Brooks S M, 1998. 213 - 227.
- [3] 于秀玲. 非点源污染对密云水库水质的影响[A]. 中国环境科学研究院环境科学论文集(1980 - 1990)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 27 - 31.
- [4] Wang J Y, Wang S J, Chen Y. Study on leading loss of nitrogen in rice fields by using large undisturbed monolith lysimeters[J]. *Pedosphere*, 1994, 4(1): 87 - 92.
- [5] Owens L B, Edwards W M, Van Keuren R W. Nitrate leaching from grassed lysimeters treated with ammonium nitrate of slow release nitrogen fertilizer[J]. *J Environ Qual*, 1999, 28: 1810 - 1816.
- [6] Takeda I A, Fukushima and Tanaka R. Non - point pollution reduction in a paddy - field watershed using a circular irrigation system[J]. *Water Research*, 1997, 31: 2685 - 2692.
- [7] Sharpley A N, Charapa S C, Wedepohl R, et al. Managing agriculture Phosphorus protection of surface water: Issues and options[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23: 437 - 451.
- [8] Sharpley A N, and Withers P A. The environmentally sound management of agricultural phosphorus[J]. *Fertilizer Research*, 1994b, 39: 133 - 146.
- [9] Lee G F. Rule of phosphours in ectrophication and diffuse source control [J]. *Water Qual*, 1973, 24: 904 - 910.
- [10] 鲁如坤. 植物营养与肥料原理[M]. 北京: 农业出版社, 2000. 201 - 202.