

抚仙湖梁王河流域农业耕作与流域水质响应关系研究

蒋鸿昆^{1,2}, 高海鹰², 张奇^{1*}, 徐力刚¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 东南大学市政工程系, 南京 210096)

摘要:以抚仙湖北岸梁王河流域为研究对象, 选取流域中 2 种典型耕作方式水稻-小麦(R-W)轮作和烤烟-豌豆(T-P)轮作的农田. 通过对农田地下水和梁王河水的同步观测及农田耕作情况的调查, 发现移栽、施底肥、追肥及排水等耕作措施使地下水中的 TP、 PO_4^{3-} -P、TN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量在短时间尺度内有明显升高. 农田作物在不同生育期对养分的吸收规律与地下水中的 TP、 PO_4^{3-} -P、TN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量在长时间尺度上响应关系明显, 作物处于对相应养分吸收高峰期时地下水中该养分含量就会明显降低, 反之则会升高. 梁王河水 TP 和 PO_4^{3-} -P 的含量在流域农田全处于耕作期时要比流域部分农田处于休闲期分别低 5.8% 和 21.7%, 而 TN、 NH_4^+ -N 及 NO_3^- -N 含量在流域农田全处于耕作期要比流域部分农田处于休闲期分别高 11.5%、242.6% 和 9.55%.

关键词: 农业耕作; 水质; 响应; 抚仙湖流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)10-2294-07

Response of Water Quality to Agricultural Cultivation in Liangwanghe River Catchment of Fuxianhu Lake Region

JIANG Hong-kun^{1,2}, GAO Hai-ying², ZHANG Qi¹, XU Li-gang¹

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Response of water quality to agricultural cultivation was investigated for the Liangwanghe River catchment of Fuxianhu Lake region in Yunnan Province of China. Two typical tillage lands-the rice-wheat rotation (R-W) and the tobacco-pea (T-P) rotation were selected and monitored. Groundwater quality and water quality of Liangwanghe River were monitored simultaneously, as well as the farmland cultivation situation at that time. It was found that cultivation activities, such as transplanting, base fertilizer applying, top dressing, draining would cause apparent elevation of concentrations of TP, PO_4^{3-} -P, TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N of groundwater in a short time period. Nutrients adsorption by crops during different bearing periods has an obvious relationship to the change of contents of TP, PO_4^{3-} -P, TN, NO_3^- -N, and NH_4^+ -N in groundwater in a long time scale. When the crops are in a peak demand for nutrients, contents of nutrients in groundwater were found to reduce obviously, and contents of nutrients may rise for other crop conditions. Contents of TP and PO_4^{3-} -P of Liangwanghe River for full cultivation periods were found to be 5.8% and 21.7% lower than those for partial cultivation periods, while contents of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N for full cultivation periods were found to be 11.5%, 242.6% and 9.55% higher than those for partial cultivation periods.

Key words: agricultural cultivation; water quality; response; Fuxianhu Lake region

流域水质状况受流域内的自然和人类活动这 2 大类因素的影响, 其中人类活动往往是导致流域水质恶化的最主要原因. 人类活动对河流水环境的作用表现在: 人类索取水资源, 并向其中排放生活、生产中的各种废弃物, 人类活动不仅能够产生点源污染, 而且能够产生和加剧非点源污染, 如农药化肥的过量施用、城市径流、畜禽养殖和农业与农村废弃物等污染物来源都是由于流域人类活动引起的. 可见, 水环境质量与流域内的人类活动密切相关. 国外对流域水质与流域人类活动关系的研究始于 20 世纪 60 年代, 最初多是从土地利用角度采用统计分析的方法进行, 近年来才重视流域人口、农事活动、土地利用结构等因素对河流水质的影响^[1-5]. 我国在这方面开展的研究不多, 谢红彬等从经济发展和城市

化等角度探讨了太湖流域水环境与人类活动之间存在相互制约、相互作用的关系^[6], 毕二平等研究了人类活动引起的河北平原地下水化学组分的改变^[7], 李怀恩等在总结国外研究成果的基础上对河流水质与流域人类活动之间的定量关系进行了研究^[8]. 针对我国的研究远不能满足水资源保护与水污染控制迫切需要的现状, 本研究选择人类的农事活动将其作为一个主要因素探讨了人类的农业耕作与流域水质之间的关系, 对从农业耕作角度控制抚仙湖北岸

收稿日期: 2006-11-27; 修订日期: 2007-03-14

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金项目(40471018); 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金项目(CXNIGLAS-2004-1)

作者简介: 蒋鸿昆(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为给水排水与面源污染, E-mail: jhk20004@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

农业面源污染具有一定的指导作用.

1 材料与方法

1.1 试验地点

抚仙湖位于云南省玉溪市境内,跨澄江、华宁、江川 3 县,系珠江上游西江水系南盘江流域的源头型湖泊,属我国主要大江大河上游水源的保护范围.抚仙湖是我国第二大深水湖泊,面积 212 km²,最大水深 157.3 m,平均水深 87.0 m,容水量 189.3 亿 m³.抚仙湖地处滇中干旱缺水地区,平均每年有将近 1 亿 m³ 的富余水量,是玉溪地区宝贵的水资源.因此,抚仙湖是玉溪地区经济可持续稳定发展的重要保证.抚仙湖的污染源主要来自抚仙湖北岸,位于抚仙湖北岸的澄江坝子是抚仙湖流域内人口密度最大的区域,人口集中,经济发达.北岸的居民生活污水、工业污水、农业面源污染(牲畜污染物及农业化肥的流失等)成为抚仙湖的主要污染源.经过调查发现抚仙湖北岸径流区污染负荷年产生总量占整个抚仙湖流域污染负荷年产生量的 60.9%,其中与抚仙湖富营养化密切相关的 N 和 P 的流失量分别占整个流域 N 和 P 流失量的 67.8% 和 54.7%.

梁王河位于抚仙湖北岸(图 1)在抚仙湖流域 30 余条入湖河道中梁王河的集水面积最大为 70.8 km²,梁王河流域面积为 33.31 km²(仅次于东大河)排名第二^[9],可见其对于抚仙湖北岸的农业面源污染研究具有相当代表性.同时梁王河流域用地以农业用地为主,这些为进行农田 N、P 流失的研究提供了很好的条件.

本试验地点位于抚仙湖北岸入湖河道梁王河的西侧,2 块农田面积均为 0.022 hm²,其中 1 块为水稻

-小麦(R-W)轮作,另 1 块为烟草-豌豆(T-P)轮作,这 2 种耕作方式是梁王河流域极具代表性的耕作方式,试验地点的土壤为潴育型水稻土^[9].

1.2 试验方法

在 2 块地的田埂边埋设地下水观测管(分别编号为 1 号和 2 号),管径为 11 cm,管长 1.5 m,在管的下部距管底 10 cm 处用电钻钻开数排直径 0.5 cm 的小孔.管垂直埋设入地下含水层,1 号管的埋深为 1.2 m,2 号管的埋深为 0.9 m(图 2).本研究通过对梁王河流域的耕作方式进行全面的调查同时对该流域设立的 2 口地下水井及梁王河水水质的连续监测寻找耕作与梁王河流域水质的响应关系.

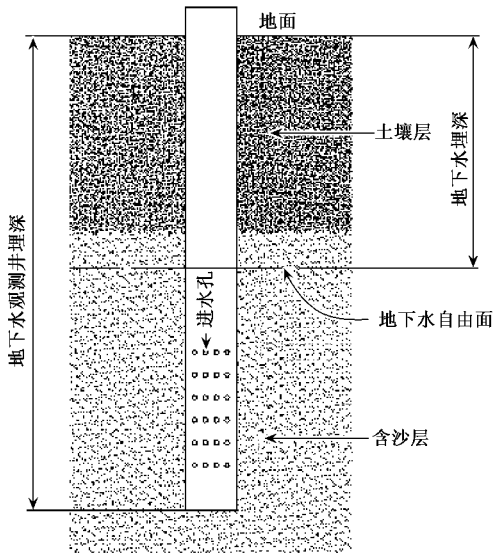


图 2 地下水观测井埋设示意

Fig.2 Schematic diagram of groundwater monitoring well

1.3 采样频率和相关量测定

对各采样点每 2 d 进行 1 次采样,采样时间为当地时间 17:00 ~ 19:00,采样周期为 2006-04-01 ~ 2006-09-25.同时对农田中耕作情况的变化进行深入细致的观察记录.

水样的测定方法:硝酸盐(酚二磺酸分光光度法,GB 7840-87),总磷,磷酸盐(钼酸铵分光光度法,GB 11893-89),总氮(紫外分光光度法,GB 11894-89),氨氮(水杨酸-次氯酸盐光度法,GB 7481-87).

2 结果与讨论

2.1 观测期农田耕作情况

本试验选择的农田 1 块为水稻-小麦(R-W)轮作,另 1 块为烟草-豌豆(T-P)轮作,2006-03-31 前,2 块田里的小麦和豌豆已经收割完毕,从 2006-04-01

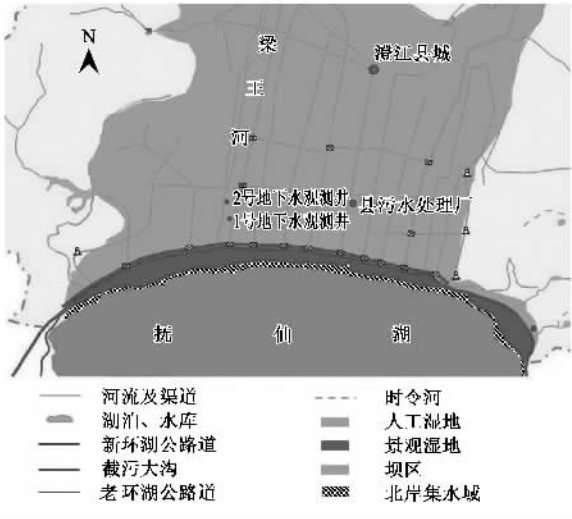


图 1 抚仙湖北岸平原区

Fig.1 Plain area on the north shore of Fuxianhu Lake

~2006-04-25 均处于耕作休闲期,04-12 对即将种植水稻的田进行灌溉,随后对其进行机械翻耕,施底肥(碳铵),04-25 插秧(采用机械插秧),04-21 对即将种植烟草的田进行灌溉,翻耕起垄,04-26 移栽烟草苗,在种的同时施底肥(烟草专用肥).水稻在种植后于 05-04 对其进行追肥(碳铵),烟草在种植后分别于 05-03、05-13、05-22、05-30 及 06-12 对其追肥(烟草专用肥),水稻田分别在 07-06、07-17、07-26 有 1 次排水过程,水稻于 09-18 收割.烟草田于 08-01 开始收割烟草,08-29 烟草田在经过机械翻耕后移栽豌豆苗并施底肥.

2.2 农田耕作措施与流域水质变化响应关系分析

2.2.1 TP 含量

图 3 为在 2 种不同耕作措施下 1 号和 2 号地下水井中 TP 含量随时间的变化趋势.水稻田地下水 TP 含量在施底肥和移栽后产生 1 个极大值,水稻在生长初期根系还没发展完全,吸收的主要是秧苗的营养,这就造成进入地下水中 TP 含量在生长初期的 10 d 内处于一个较高的水平,在水稻生长处于分蘖期和拔节期时,水稻生长吸收大量磷使地下水中 TP 含量在大部分时间都处于较低水平.7 月中旬水稻开始处于抽穗期,这时水稻茎秆已经生长完全对 P 的吸收量开始下降^[10],使地下水中 TP 含量维持在一个较高的水平.从 8 月中旬开始,水稻生长进入后期,水稻对各种营养的吸收开始下降,土壤中 N、P 的含量在前期被水稻大量吸收下开始减少,同时水稻田在后期基本处于非淹水状态下,下渗入地下水中的 P 开始大量减少,这些都造成地下水中 TP 含量处于较低的水平.水稻田在水稻抽穗期的 3 次排水也对地下水中 TP 含量产生了影响,每次排水都造成地下水中 TP 含量小幅度升高.

总体上看烟草在生长期间,2 号地下水中 TP 含量变化幅度不大,但是一些具体的耕作措施还是对其变化产生了较大的影响,从图 3 可以看出,烟草在施底肥和随后的 5 次追肥中均使地下水中的 TP 含量产生跃升并达到 1 个极大值.在烟草开始收割(08-01)后地下水中 TP 含量维持在一个较高的水平,经过分析计算(表 1),农田处于烟草生长期地下水中 TP 含量的平均值为 $0.054\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而农田处于休闲期地下水中 TP 含量的平均值为 $0.153\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,休闲期高出作物生长期时的 2 倍.由此可见,烟草田在大量施用烟草专用肥后,田中土壤养分含量充足,烟草收割后,残留大量的烟叶使土壤的有机质增加,加大了土壤淋溶进入地下水中磷的量.烟草田在移

栽豌豆苗和施底肥后,地下水中的 TP 含量在短期内维持在很高的水平,由此可见烟草-豌豆(T-P)轮作的农田在作物移栽并施底肥后的 10 d 时间内是磷素流失进入地下水的高风险期.

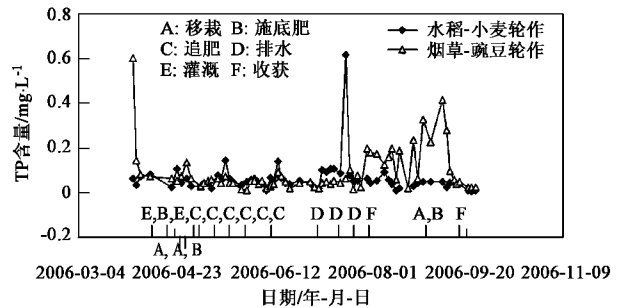


图 3 不同耕作措施下地下水中 TP 含量
(2006-04-01 ~ 2006-09-25)

Fig.3 Content of TP in groundwater for two tillage-cropping systems

2.2.2 PO_4^{3-} -P 含量

图 4 为在 2 种不同耕作措施下地下水中 PO_4^{3-} -P 含量的变化趋势,水稻田地下水中 PO_4^{3-} -P 含量在耕作措施作用下的变化与 TP 变化基本相同,在整个水稻生长期水稻田地下水中 PO_4^{3-} -P 含量占 TP 的 52.3%.烟草田在烟草生长期 PO_4^{3-} -P 含量与 TP 的变化基本相同, PO_4^{3-} -P 含量占 TP 的 44.4%,在 08-01 烟草田处于休闲期后 TP 含量大幅升高而 PO_4^{3-} -P 含量则维持在较低水平,这主要是因为烟草的收割过程并不是一次收割而是根据烟叶的颜色逐渐收割,且收割后的烟草秸秆一般留在田中作为豌豆架使用,这样造成大量的烟叶、秸秆等有机物料残留在农田中,这些有机物料富含各种养分和生理活性物质,能通过改善土壤结构,调节土壤水分、空气和温度而影响土壤物理性质.同时有机物料也带入了较多的有机磷,有机磷在降雨淋溶的驱动下进入地下水使地下水中的有机磷含量较作物生长期大大增加.

2.2.3 TN 含量

总体上看,水稻-小麦(R-W)轮作的 1 号地下水井 TN 含量在整个观测期要比烟草-豌豆(T-P)轮作的 2 号井高很多,从表 1 可以看出,水稻田在整个观测期 TN 含量($6.498 \pm 1.222\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),烟草田为($3.399 \pm 0.425\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),水稻田是烟草田的近 2 倍,这主要是因为水稻田在施底肥和追肥时均为氮肥而烟草田在施底肥和追肥时为烟草专用肥.从图 5 可以看出,在施底肥和追肥等耕作措施后 2 个地下水观测井的 TN 含量均有一定的升高.水稻生长处于

表 1 不同耕作制下作物生长期与休闲期流域水质情况对比

Table 1 Comparison of water quality of crop vegetal and fallow periods for two different cultivation systems

耕作制	日期 /年-月-日	时间 /d	采样次数 (n)	TP/ mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹	TN/ mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹
水稻-小麦 (R-W)轮作	2006-04-01 ~ 2006-09-25	178	67	0.063 ± 0.075 ¹⁾	0.033 ± 0.019	6.069 ± 1.596	0.067 ± 0.064	3.487 ± 1.091
	水稻生长期(04-25 ~ 09-17)	146	58	0.065 ± 0.080	0.034 ± 0.019	6.498 ± 1.222	0.054 ± 0.045	3.750 ± 0.891
	休闲期(04-01 ~ 04-24, 09-18 ~ 09-25)	32	9	0.047 ± 0.035	0.033 ± 0.022	3.540 ± 0.660	0.147 ± 0.095	1.847 ± 0.408
烤烟-豌豆 (T-P)轮作	2006-04-01 ~ 2006-09-25	178	67	0.092 ± 0.100	0.031 ± 0.063	3.328 ± 0.586	0.181 ± 0.202	1.278 ± 0.685
	烤烟生长期(04-26 ~ 08-01)	98	40	0.054 ± 0.034	0.024 ± 0.014	3.399 ± 0.425	0.145 ± 0.209	1.395 ± 0.617
	豌豆生长期(08-29 ~ 09-25)	28	11	0.143 ± 0.136	0.007 ± 0.004	3.008 ± 0.416	0.314 ± 0.205	0.751 ± 0.545
	休闲期(04-01 ~ 04-25, 08-02 ~ 08-28)	52	16	0.153 ± 0.017	0.063 ± 0.014	3.382 ± 0.755	0.179 ± 0.018	1.345 ± 0.579
梁王河水	2006-04-01 ~ 2006-09-25	178	67	0.122 ± 0.081	0.063 ± 0.043	4.636 ± 4.282	0.167 ± 0.335	2.619 ± 2.182
	流域作物全处于生长期(04-26 ~ 08-01, 08-29 ~ 09-17)	118	48	0.120 ± 0.065	0.060 ± 0.026	4.783 ± 4.271	0.209 ± 0.387	2.685 ± 2.156
	流域部分农田处于休闲期(04-01 ~ 04-25, 08-02 ~ 08-28, 09-18 ~ 09-25)	60	19	0.127 ± 0.111	0.073 ± 0.068	4.288 ± 4.288	0.061 ± 0.031	2.451 ± 2.236

1)平均值 ± 标准误差,下同

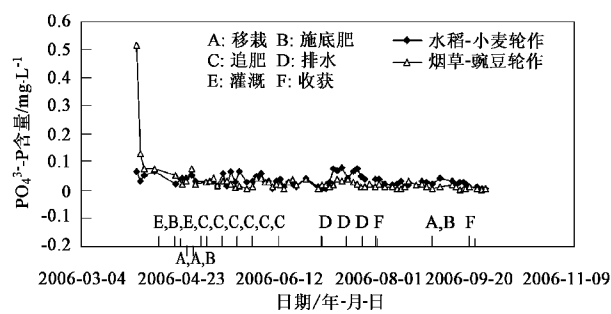


图 4 不同耕作措施地下水 PO₄³⁻-P 含量
(2006-04-01 ~ 2006-09-25)

Fig.4 Content of PO₄³⁻-P in groundwater for two tillage-cropping systems

分蘖期和拔节期地下水中 TN 含量处于一个较高的水平,通过与图 6 和图 7 的对比分析可以看出该时期有机态氮在地下水中占有相当的比重^[11,12],从 7 月中旬水稻生长进入抽穗期后 TN 含量有明显降低趋势,这主要是因为水稻在抽穗前没有追施氮肥造成穗肥不足,进入地下水中的氮素减少,水稻生长后期地下水中 TN 含量下降趋势明显.水稻抽穗期的 3 次排水过程也使水稻田 TN 含量小幅度升高.烟草田地下水 TN 含量在整个烟草生长期并没有大的变化,耕作措施只是在短期内使 TN 含量产生变化,08-01 ~ 08-28 耕作休闲期地下水中 TN 含量仍然维持在原来水平,08-29 移栽豌豆苗并施底肥后,地下

水中 TN 含量在初期达到 1 个极大值后有明显下降趋势,这主要是因为移栽豌豆后没有追肥,当豌豆苗开始生长并吸收养分后,地下水中 TN 含量开始下降.

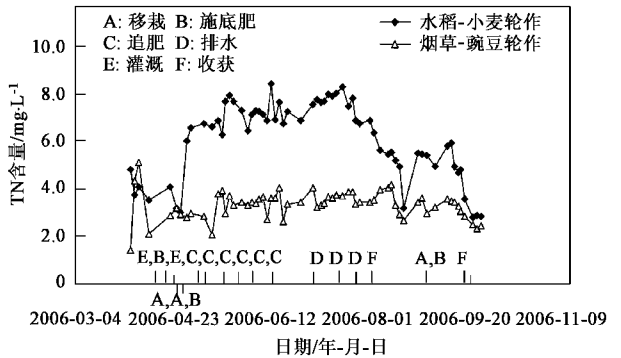


图 5 不同耕作措施地下水 TN 含量
(2006-04-01 ~ 2006-09-25)

Fig.5 Content of TN in groundwater for two tillage-cropping systems

2.2.4 NO₃⁻-N 含量

图 6 为在 2 种不同的耕作措施下 1 号和 2 号地下水井中 NO₃⁻-N 含量的变化趋势.通过比较图 6 和图 5 可以发现,在水稻-小麦(R-W)轮作的水稻田,水稻生长进入分蘖期和拔节期后地下水中 TN 的含量较高而 NO₃⁻-N 的含量则比水稻生长初期低,这表

明水稻在分蘖期和拔节期除了吸收大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同时也吸收了较多的硝氮^[13-18], 在水稻生长进入抽穗期, 地下水中 TN 含量和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 基本保持同步下降趋势, 这时水稻对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收开始下降. 在整个生长期烟草田地下水中 TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化趋势相似. 通过比较图 6 和图 7 发现进入烟草生长后期, 地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著降低而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著增大. 烟草在生长期对氮的吸收以无机氮为主, 在烟草移栽后的 30~60 d 为氮的吸收高峰, 当烟草根系在生长适温即土温 30~32℃ 时, 对氮素的吸收量最旺盛, 当土温由低温向适温升高时, 烟草对硝态氮素的吸收量显著多于对氨态氮的吸收量. 烟草田土壤的硝化作用和氨化作用强度也对烟草对氮素的吸收产生了重要影响, 6~7 月份当地气温不高, 降雨量较多同时降雨天数也多, 雨水和温度的适宜条件都促使土壤硝化作用的进行, 8 月份相对降雨量偏少, 土壤通气性较好, 同时气温升高, 这些都有利于土壤氨化作用的进行^[19]. 这些因素综合作用造成了烟草生长后期地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的减少及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的升高.

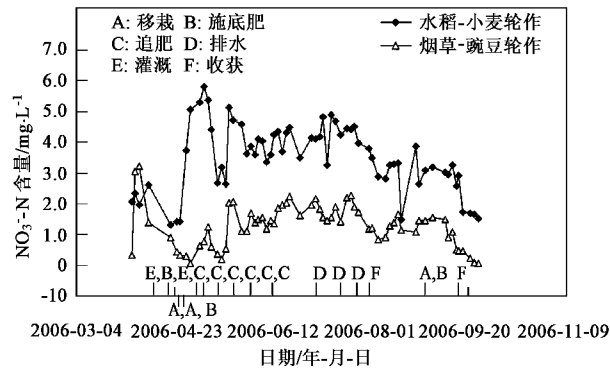


图 6 不同耕作措施地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量
(2006-04-01 ~ 2006-09-25)

Fig. 6 Content of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in groundwater for two tillage-cropping systems

2.2.5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量

图 7 为在 2 种不同的耕作措施下 1 号和 2 号地下水井中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化趋势. 水稻-豌豆 (R-W) 轮作的水稻田在施底肥和移栽秧苗后地下水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高, 这主要是因为水稻秧苗根系还没有生长完全, 还没有开始吸收水稻田中的营养, 秧苗在移栽后 10 d 左右, 水稻田中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量基本保持稳定, 排水等耕作措施仅使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有小幅上升, 在水稻收割前期和收割后地下水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

含量有了一个较大的升高, 处于休闲期的 R-W 轮作农田地下水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 $(0.147 \pm 0.095) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 比水稻生长期的 $(0.054 \pm 0.045) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高出近 2 倍.

烟草-豌豆 (T-P) 轮作的烟草田在烟草苗移栽前期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量一直很高, 这与水稻相似, 在烟草生长一段时间后, 地下水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量保持稳定, 从烟草收割的 08-01 到豌豆苗移栽的 08-29 间的耕作休闲期地下水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 $(0.179 \pm 0.018) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 比烟草生长期的 $(0.145 \pm 0.209) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高出 23.4%, 在豌豆苗移栽和施底肥后地下水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有了大幅度的升高, 这表明 T-P 轮作的农田在作物移栽后 10 d 左右为地下水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量升高的高风险期.

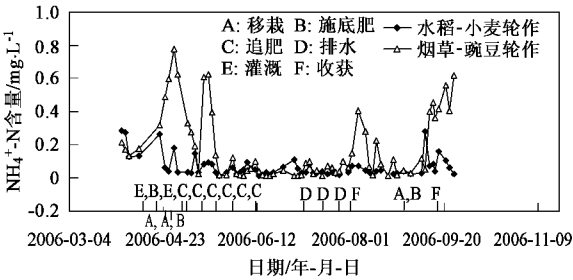


图 7 不同耕作措施地下水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量
(2006-04-01 ~ 2006-09-25)

Fig. 7 Content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in groundwater for two tillage-cropping systems

2.3 流域农田不同时期梁王河水水质对照分析

梁王河流域农田处于不同时期, 与梁王河水水质之间存在响应关系. 通过图 8 可以看出, 梁王河水 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的指标在流域农田全处于耕作期时要比流域部分农田处于休闲期分别低 5.8% 和 21.7%, 而 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 指标在流域农田全处于耕作期要比流域部分农田处于休闲期分别高 11.5%、242.6% 和 9.55%. 梁王河水水质 N 和 P 指标表现出完全不同的趋势. 土地利用/土地覆被 (Land Use/Land Cover, LULC) 通过影响区域中的物质循环和能量分配, 对区域土壤、水量和水质等的影响极其深刻^[20-23]. 在梁王河流域农田部分处于休闲期, 流域植被的覆盖度降低, 暴雨等引起的径流量增大, 这样土壤表层的颗粒态磷通过地表径流进入流域地表水的量较农田耕作期增加了很多^[24-26]. 在氮的地表径流失方面, 根据张兴昌、邵明安等的研究在流域植被的覆盖度逐渐降低时, 土壤中氨态氮和硝态氮的流失量也逐渐减少^[27], 这从本试验对梁王河水水质

的监测中也得到了证实.

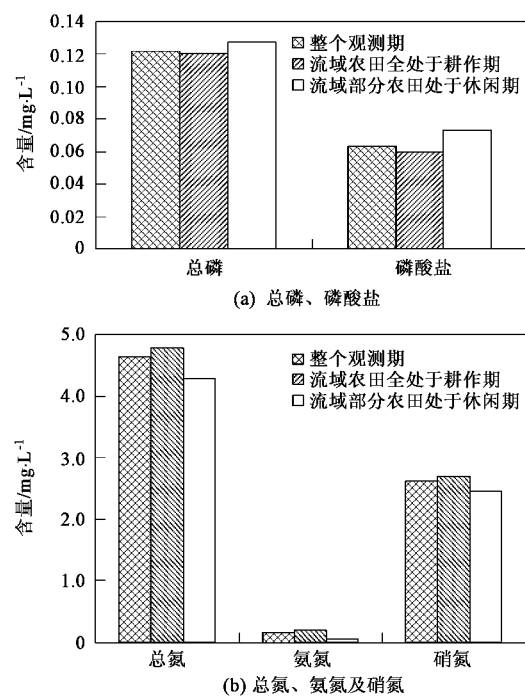


图 8 流域农田不同时期梁王河水质对照分析

Fig.8 Water quality of Liangwanghe River for different periods of agricultural activities

3 结论

(1)移栽、施底肥、追肥和排水等主要耕作措施对水稻-小麦(R-W)轮作和烤烟-豌豆(T-P)轮作农田地下水的氮、磷含量在短时间尺度(2~10 d)产生相似的响应关系.移栽和施底肥后地下水中氮、磷含量产生大幅升高,追肥和排水使氮、磷含量在短期内产生小幅升高.水稻在分蘖期与拔节期对氮肥的需求较多,地下水中的氮含量均保持在较低水平,水稻生长进入抽穗期对磷的吸收量减少相应的地下水中总磷含量升高.烟草田由于过量施肥及农田残留大量烟叶、秸秆等,造成了在烟草生长末期和收割后地下水中的总磷含量大幅升高.农田施肥类型不同,造成对应农田地下水中氮、磷含量差异明显,水稻田水稻生长期地下水总氮含量是烟草田烟草生长期地下水含量的1.9倍.梁王河水质在农田耕作期与部分农田处于休闲期的变化则反映出在流域植被覆盖度减少时,地表径流带入梁王河水中的磷的含量增加而氮的含量则减少.

(2)通过对比2种不同轮作方式的农田地下水水质可以发现,烤烟-豌豆(T-P)轮作地下水在作物生长期比水稻-小麦(R-W)轮作地下水的氮、磷含量

均低,由此可以得出,大面积采用烤烟-豌豆(T-P)轮作有利于减少农田地下水的污染.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所李文朝研究员,徐进、夏天翔和郑锦等研究生提供的指导与帮助.

参考文献:

[1] Bricklemyer R S, Lawrence R L, Miller P R, *et al.* Predicting tillage practices and agricultural soil disturbance in north central Montana with Landsat imagery [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, **213**: 2692 ~ 2699.

[2] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal [J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, **70**: 131 ~ 140.

[3] Vargas M T, Lopez M T, Stone J J, *et al.* Tillage system effects on runoff and sediment yield in hillslope agriculture [J]. *Field Crops Research*, 2001, **69**: 173 ~ 182.

[4] Lowery B, Hartwig R C, Stoltenberg D E, *et al.* Groundwater quality and crop-yield responses to tillage management on a Sparta sand [J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, **48**: 225 ~ 237.

[5] Choudhary M A, Lal R, Dick W A. Long-term tillage effects on runoff and soil erosion under simulated rainfall for a central Ohio soil [J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, **42**: 175 ~ 184.

[6] 谢红彬,虞孝感,张运林.太湖流域水环境演变与人类活动耦合关系[J].*长江流域资源和环境*,2001,**10**(5):393~400.

[7] 毕二平,母海东.人类活动对河北平原地下水水质演化的影响[J].*地球学报*,2001,**22**(4):365~368.

[8] 李怀恩,李越,蔡明,等.河流水质与流域人类活动之间的关系[J].*水资源与水工程学报*,2004,**15**(1):24~28.

[9] 中国科学院南京地理湖泊研究所编.抚仙湖[M].北京:海洋出版社,1990.89~95.

[10] 王江民.水稻对主要营养元素的吸收及合理施肥[J].*农村实用技术*,2005,(7):16~17.

[11] 张亚丽,沈其荣,段英华.不同氮素营养对水稻的生理效应[J].*南京农业大学学报*,2004,**27**(2):130~135.

[12] 朱新开,盛海君,夏小燕,等.稻麦轮作田氮素径流流失特征初步研究[J].*生态与农村环境学报*,2006,**22**(1):38~41.

[13] 汪华,杨京平,金洁,等.不同氮素用量对高肥力稻田水稻-土壤-水体氮素变化及环境影响分析[J].*水土保持学报*,2006,**20**(1):50~54.

[14] 王荣萍,余炜敏,黄建国,等.田间条件下氮的矿化及硝态氮淋溶研究[J].*水土保持学报*,2006,**20**(1):81~83.

[15] 黄建晔,杨洪建,杨连新,等.水稻不同生育时期N素营养对FACE响应的研究[J].*作物学报*,2004,**30**(12):1237~1243.

[16] 田大成,雷龙坤,兰廷明,等.水稻不同生育阶段营养条件与抽穗期的关系[J].*杂交水稻*,2004,**19**(4):59~65.

[17] 金洁,杨京平,施洪鑫,等.水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J].*农业环境科学学报*,2005,**24**(2):357~361.

[18] 张亚丽,董园园,沈其荣,等.不同水稻品种对氨态氮和硝态氮吸收特性的研究[J].*土壤学报*,2004,**41**(6):918~922.

[19] 丁美丽,陆引罡,赵承,等.烟地土壤氮素的氨化作用与硝化

作用的强度变化[J]. 贵州农业科学, 2006, **34**(4): 36 ~ 38.

[20] Aheam D S, Sheibley R W, Dahlgren R A, *et al.* Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California [J]. Journal of Hydrology, 2005, **313**: 234 ~ 247.

[21] Judova P, Jansky B. Water quality in rural areas of the Czech Republic: Key study Slapanka River catchment [J]. Limnologica, 2005, **35**: 160 ~ 168.

[22] 于兴修, 杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响——以太湖上游浙江西苕溪流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2003, **12**(3): 211 ~ 217.

[23] 刘瑞民, 杨志峰, 沈珍瑶, 等. 土地利用/覆盖变化对长江流域非点源污染的影响及其信息系统建设[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(3): 372 ~ 377.

[24] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 35 ~ 40.

[25] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(11): 1543 ~ 1549.

[26] 崔力拓, 李志伟, 王立新, 等. 农业流域非点源磷素迁移转化机理研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(Sup): 353 ~ 355.

[27] 张兴昌, 邵明安. 植被覆盖度对流域有机质和氮素径流流失的影响[J]. 草地学报, 2000, **8**(3): 198 ~ 202.