

# 柴河流域种植方式与沟渠类型对农田径流氮、磷含量的影响

吴晓妮<sup>1,2,3</sup>, 付登高<sup>1</sup>, 段昌群<sup>1</sup>, 闫曦<sup>1</sup>, 蒋霞<sup>1</sup>

(1. 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091; 2. 昆明学院生命科学与技术系, 昆明 650214; 3. 云南省高校特色生物资源开发与利用重点实验室, 昆明 650214)

**摘要:** 为了解高原湖泊流域内农田种植方式及沟渠类型对雨季径流中固体悬浮物及氮磷浓度变化的影响, 在柴河流域不同农田种植方式(蔬菜地、玉米地、大棚种植区)的区域内选择典型自然沟渠及土质沟渠进行自然降雨过程中径流氮、磷含量分析。结果表明: (1) 该区域农田径流水体总氮(TN)、总磷(TP)平均值为27.16, 17.18 mg/L, 相对地表V类水质限值而言超标严重, 溶解态氮(DN)与颗粒态磷是氮、磷的主要存在形态, 符合面源污染特征; (2) 降雨是影响径流污染物含量最重要的因素之一。除此之外, 种植方式对总氮、溶解态氮及溶解态磷(DP)具有显著影响( $P < 0.05$ ), 而沟渠类型对污染物含量的影响不显著( $P > 0.05$ ); (3) 在同一降雨量(18.05 mm)条件下, 蔬菜地及大棚区的农田径流氮含量(TN: 32.26 mg/L 和 29.02 mg/L, DN: 21.33 mg/L 和 17.46 mg/L)显著高于玉米地(TN: 18.33 mg/L, DN: 6.23 mg/L), 大棚区径流的磷素含量(TP: 17.46 mg/L, DP: 2.16 mg/L)则显著高于蔬菜地(TP: 6.89 mg/L, DP: 1.38 mg/L)及玉米地(TP: 7.92 mg/L, DP: 0.64 mg/L); 自然沟渠相对于土质沟渠可以显著降低径流中的总磷、DN及DP含量( $P < 0.05$ )。研究结果表明在同一降雨量条件下, 土地种植方式仍是影响柴河流域面源污染的主要因素, 沟渠虽然可以有效降低面源污染含量, 但其影响却小于土地种植方式。因此建议在流域面源污染控制及水土保持过程中, 首先需要对流域原有种植结构进行优化, 然后在此基础上实现对现有沟渠生态化水平的改造与提升, 以增加对面源污染物的控制效能。

**关键词:** 农田种植方式; 农田沟渠类型; 氮磷流失; 农田地表径流; 柴河流域

**中图分类号:** X592      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0038-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.007

## Effects of Planting Modes and Agriculture Drainage Ditches on Runoff Nitrogen and Phosphorus Concentration in Chaihe Watershed

WU Xiaoni<sup>1,2,3</sup>, FU Denggao<sup>1</sup>, DUAN Changqun<sup>1</sup>, YAN Xi<sup>1</sup>, JIANG Xia<sup>1</sup>

(1. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091;

2. Department of Life Science and Technology, Kunming University, Kunming 650214; 3. Key Laboratory of Special Biological Resource Development and Utilization of Universities in Yunnan Province, Kunming 650214)

**Abstract:** In order to understand the effects of planting modes and agriculture drainage ditches, nitrogen and phosphorus concentration, and suspended solids characteristics of the runoff in different types of agriculture drainage ditches from different planting area (vegetable area, corn field and greenhouse area) in the Chaihe watershed were analyzed based on the survey and monitoring of water samples under natural rainfall. The main results are as follows: (1) The average total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) contents (27.16 mg/L and 17.18 mg/L) in runoff were much higher than class V surface water quality standard limits in China, and the dissolved nitrogen (DN) and particulate phosphate were the main pollutants; (2) Rainfall was one of the most important factors influencing runoff pollutant contents, and planting mode also had the significant effect on TN, DN, and dissolved phosphorus (DP) ( $P < 0.05$ ); (3) When the rainfall was the same (18.05 mm), the higher contents of nitrogen in runoff from vegetable area and greenhouse area (TN: 32.26 mg/L, 29.02 mg/L; DN: 21.33 mg/L, 17.46 mg/L) and the higher phosphorus contents from vegetable area (TP: 17.46 mg/L, DP: 2.16 mg/L) were found. In addition, we also found that natural ditches would significantly decrease the contents of total phosphorus, dissolved nitrogen, and dissolved phosphorus

收稿日期: 2016-06-14

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-003); 国家自然科学基金项目(31360152); 云南省应用基础研究项目(2014FD040); 云南省高校特色生物资源开发与利用重点实验室开放基金(GXKM201506)

第一作者: 吴晓妮(1987—), 女, 硕士, 助教, 主要从事面源污染防治研究。E-mail: wuxiaoxiaoni@163.com

通信作者: 段昌群(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事污染及恢复生态学研究。E-mail: chquan@ynu.edu.cn

付登高(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: dgfu@ynu.edu.cn

( $P < 0.05$ ). In conclusion, planting mode was one of the main factors influencing non-point source pollution in the same rainfall. Though ditch can decrease effectively non-point source pollution, the contribution of ditch was less than the planting mode. Based on the above results, the planting structure of the watershed should be optimized at first, and then the transform of the existing ditches and the promotion of the ecological level are also needed to increase the control efficiency of the non-point source pollution.

**Keywords:** planting mode; agriculture ditch type; nitrogen and phosphorus loss; surface runoff in farmland; Chaihe watershed

农村农业面源污染是高原湖泊主要的污染源之一,已成为湖泊富营养化的主要驱动力,也是湖泊污染削减和环境治理的难点<sup>[1-2]</sup>。滇池作为我国重度富营养化湖泊,其流域内作物、花卉、蔬菜的种植强度和密度很高,如何有效控制农业种植区的水土流失及主要污染物成为目前滇池面源污染治理的重点和难点。一般而言,农田水土流失及污染物控制主要从时空两个方面进行:一是空间上优化种植结构,二是种植管理过程中的精准施肥,以减少随径流及泥沙输出而导致的养分流失<sup>[3-6]</sup>。农田作为重要的景观类型一直是面源污染防治研究中的重点,但是农田沟渠作为空间景观类型之一,虽然占地面积不大,但却成为连接不同农业种植区的廊道,也成为雨季污染物输移的主要通道<sup>[4]</sup>。因此农业种植区沟渠在控制农田面源污染过程中起到了重要的作用,但是农田沟渠在面源污染及水土流失防控过程中的相对贡献目前还少见报道。

目前,滇池流域内传统农田沟渠的类型主要有 3 种:土质沟渠、自然沟渠和浆砌沟渠。前二者大量分布在不同种植方式的农田斑块中,是滇池流域内分布最多的两类沟渠,也是农田径流主要的灌溉及排水通道。但土质沟渠存在的主要问题是降雨过程中容易产生水土流失,会对接纳水体产生一定程度上的污染,而自然沟渠可以通过生物作用吸收、吸附或拦截作用在一定程度上降低径流中的面源污染物<sup>[7]</sup>,但存在的问题是沟渠内植物盖度不高、无有效的人为管理等问题,因此有可能造成二次污染。因此可以说农田沟渠对面源污染物的控制作用不仅需要考虑其所处的农田种植方式,还有考虑沟渠本身的属性特征。只有两者综合分析,才能更好的评估影响面源污染的主要因素并正确采取相应水土保持及面源污染防治措施。因此,为了了解高原湖泊流域内不同农田种植方式及沟渠类型组合对雨季径流中固体悬浮物及氮磷浓度变化的影响,本文在滇池流域选择不同种植类型区域中的典型沟渠类型进行自然降雨过程中径流的收集与面源污染物含量分析,以验证种植方式及沟渠类型不同组合下农田径流中氮、磷的流失特征及其相对贡献,对正确评估农田非点源对环境的污染和影响,进而为滇池流域有效控制农田非点源污染提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省中部、滇池南岸的柴河流域。地理位置为北纬  $24^{\circ}36' - 24^{\circ}37'$ ,东经  $102^{\circ}41' - 102^{\circ}42'$ ,海拔  $1\ 936 \sim 2\ 256$  m,属丘陵地带,亚热带季风气候。该区域农田主要以坡耕地、坝平地及大棚种植区为主,根据气象站资料统计,流域内平均年降雨量为  $925.4$  mm,干湿两季分明,雨季主要集中在 5—10 月,降水量占全年降雨量的  $85.9\%$ ,干季(11 月—翌年 4 月)干旱少雨,降水量占全年降雨量的  $14.1\%$ ;流域暴雨多发生在 6—8 月。暴雨历时短,强度大。雨季降雨能形成较明显的农田径流,加上较强的人为农业活动,易形成比较严重的面源污染。

### 1.2 研究方法

1.2.1 典型区域及沟渠的选择 以柴河流域内主要农田分布区作为调查范围,以柴河为界,分为东边和西边两部分,西边靠近山脚,主要以露天居多,径流汇入柴河。东边为坝平地以塑料大棚居多,农田径流汇入柴河。该区域沟渠主要包括:一级沟渠(三面光水泥沟渠与柴河连通)、二级沟渠(连通一级沟渠的斗渠)、三级沟渠(一块地与一块地之间的沟渠)、四级沟渠(连通三级沟渠的毛沟)。采用 GPS 对径流收集沟渠定点,得到沟渠分布及长度,同时记录沟渠的宽度、深度、质地、植物种类、植被覆盖度等信息。

在调查基础上,随机选取 5 个典型二级沟渠,基本特征见表 1。自然沟渠植被主要优势植物种类为喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.)、紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum* Spreng.)、土荆芥(*Chenopodium ambrosioides* L.)。

1.2.2 样品采集与测定 为了解沟渠径流污染物含量变化特征,在 1~5 号沟渠根据其沟渠长度,等距离分别设置 4,4,5,6,4 个采样点,共为 23 个采样点。于 2012 年雨季对 7 次降雨(6 月 20 日,7 月 14 日,7 月 18 日,7 月 24 日,8 月 1 日,8 月 11 日,8 月 14 日)进行混合水样的采集,降雨情况分别为  $16.6, 16.7, 16.8, 20.2, 16.6, 10.8, 26.6$  mm。取  $500$  ml 于采样瓶中酸化后带回实验室,分析 SS(固体悬浮物)、TN(总氮)、TP(总磷)、DN(溶解态氮)和 DP(溶解态磷)含量。水样 SS 含量采用称重法测定;水中 TN 测定

采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法；水中 TP 的测定采用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定；

DN 与 DP 测定用 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜进行过滤，滤液的测定采用同 TN 与 TP 的测定方法进行测定。

表 1 试验沟渠基本特征

编号	沟渠类型	长度/ m	宽度/ m	深度/ m	汇水区土地 种植方式	沟渠植物 覆盖率/%	沟渠土壤总氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	沟渠土壤总磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1	自然沟渠	81.0	1.00	0.70	蔬菜地	90	$2.49 \pm 0.06$	$3.73 \pm 0.35$
2	土质沟渠	77.6	0.95	0.65	蔬菜地	5	$2.68 \pm 0.01$	$3.72 \pm 0.42$
3	土质沟渠	86.0	0.90	0.60	大棚	5	$3.28 \pm 0.23$	$8.35 \pm 0.09$
4	土质沟渠	90.0	0.90	0.58	玉米地	5	$2.02 \pm 0.42$	$2.50 \pm 0.19$
5	自然沟渠	75.7	0.87	0.50	玉米地	90	$2.36 \pm 0.29$	$2.67 \pm 0.12$

1.2.3 数据处理 利用 Excel 和 SPSS 对不同种植方式、不同类型的沟渠径流中氮、磷及 SS 含量的变化特征进行作图并进行方差分析及显著性检验。在统计影响雨季径流污染物含量的变化时,以种植方式及沟渠类型作为固定变量,以降雨作为协变量,进行协方差分析,并基于协变量相同条件下,比较分析不同沟渠类型和种植方式下径流污染物含量的差异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 沟渠径流氮含量的变化

雨季内沟渠径流中总氮及可溶性氮含量的变化

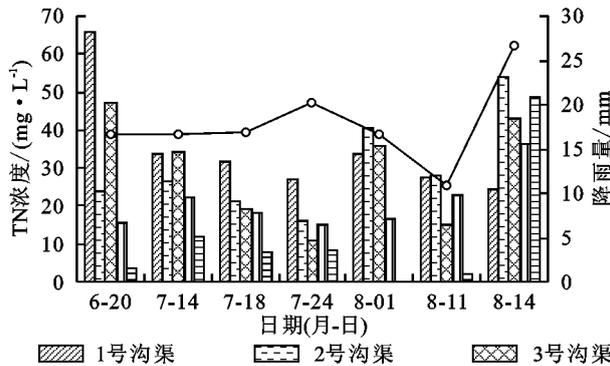
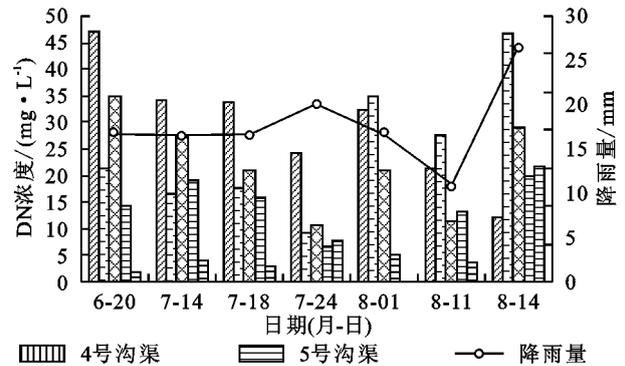


图 1 雨季不同属性沟渠径流总氮(TN)及溶解态氮(DN)含量的变化



### 2.2 沟渠径流磷含量的变化

从图 2 可以看出,1 号沟渠总磷浓度最高值是在 7 月 14 日,为 22.6  $\text{mg/L}$ ,最低浓度为 2.34  $\text{mg/L}$ ;2 号沟渠和 1 号沟渠总磷浓度的变化相似,浓度最高值是在 7 月 14 日为 51.55  $\text{mg/L}$ ,最低浓度为 2.95  $\text{mg/L}$ ;3 号大棚沟渠总磷浓度在 7 月 14 日达到峰值为 74.57  $\text{mg/L}$ ;5 号沟渠 8 月 14 日总磷浓度较高,为 48.4  $\text{mg/L}$ 。对可溶态磷含量

而言,1 号沟渠 7 月 14 日具有最高可溶态磷含量为 2.73  $\text{mg/L}$ ;2 号沟渠在 8 月 14 日最高为 2.65  $\text{mg/L}$ ;3 号大棚沟渠可溶性磷浓度是所有沟渠在整个雨季过程中浓度最高的,最高值在 8 月 11 日为 3.53  $\text{mg/L}$ ;4 号沟渠在 7 月 18 日最高为 2.09  $\text{mg/L}$ ;5 号沟渠可溶性磷浓度有依次升高的趋势,在 8 月 14 日出现最大值为 2.19  $\text{mg/L}$ 。所有径流全磷含量均高于 V 类水质限值(0.4  $\text{mg/L}$ )。

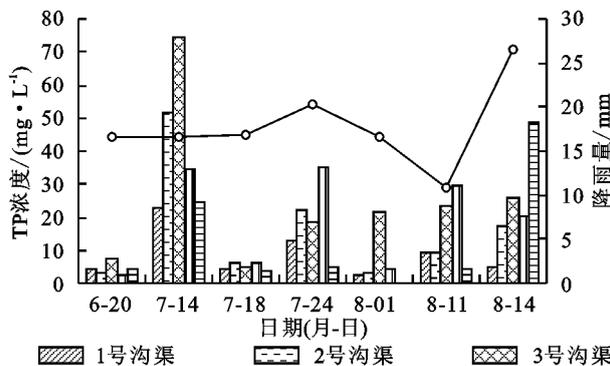
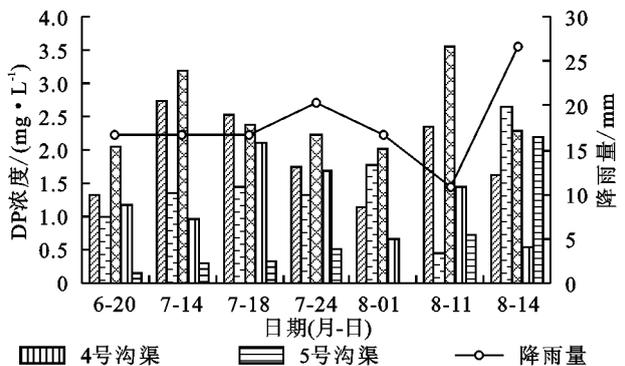


图 2 雨季不同属性沟渠径流总磷(TP)及溶解态磷(DP)含量的变化



## 2.3 沟渠径流悬浮颗粒物含量的变化

从图3可以看出,1号沟渠固体悬浮物浓度较低,最高值只有3.7 g/L,而最低值仅有1.2 g/L;2号沟渠在7月14日出现峰值,为14.0 g/L,其他降雨时间平均浓度为5 g/L左右;3号沟渠也在7月14日出现最大值,为9.8 g/L;4号沟渠在7月14日和8月11日出现较高的浓度;5号沟渠固体悬浮物浓度一直比较低,只有在8月14日浓度最高为27.5 g/L。

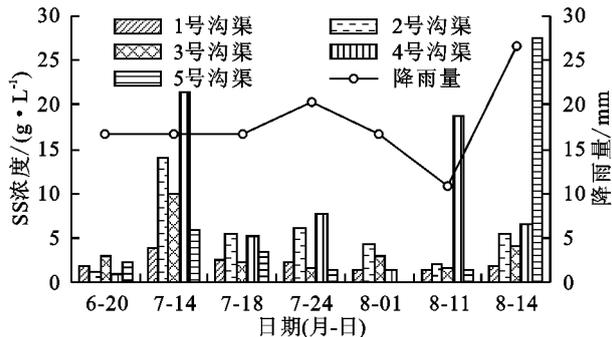


图3 雨季不同属性沟渠径流固体悬浮物(SS)的变化

## 2.4 氮磷流失形态

径流中不同形态氮磷占总量的比例见表2。从表2可以看出,溶解态氮为氮的主要流失形式,其中蔬菜地和大棚区内的沟渠溶解态氮流失比例相对较高;而磷以颗粒态磷为主要流失形式,玉米地内的自然沟渠颗粒态磷流失比例较高,达到92.3%,而蔬菜地内自然沟渠颗粒态磷流失比例较低,为68.0%。

## 2.5 影响径流污染物含量变化的主要因素

对影响雨季径流氮磷含量变化进行协方差分析,

表4 不同种植方式及沟渠类型径流污染物含量的比较

处理	总氮	总磷	溶解态氮	溶解态磷	固态悬浮物	
种植方式	蔬菜地	32.26±2.23a	6.89±1.16b	21.33±1.11a	1.38±1.11b	2.44±1.14a
	大棚区	29.02±2.99a	14.44±1.22a	17.46±1.15a	2.16±1.15a	2.25±1.20a
沟渠类型	玉米地	18.33±2.69b	7.92±1.20b	6.23±1.14b	0.64±1.13c	3.25±1.17a
	自然沟渠	25.39±2.68A	6.17±1.20B	10.18±1.13B	0.84±1.13B	2.34±1.17A
	土质沟渠	26.47±1.80A	10.49±1.13A	14.44±1.08A	1.34±1.08A	2.97±1.12A

注:降雨量为18.05 mm时不同处理下径流污染物含量的修正均数及标准误;不同小写字母表示不同种植方式之间在0.05水平上差异显著,不同大写字母表示不同沟渠类型之间在0.05水平上差异显著。

## 3 讨论

### 3.1 不同种植方式下田间沟渠氮磷流失特征

水肥条件及土壤结构属性是决定农田土壤流失及氮磷流失的主要因素。不同的土地利用方式及管理模式其土壤养分流失也有所不同。降雨过程中主要污染物的输移程度可能与降雨、农田地表覆盖及土壤属性特征、农田管理措施等相关<sup>[8,13]</sup>。滇池流域农田种植类型主要包括露天农田(如玉米地及蔬菜地)及大棚种植,本研究结果统计后表明相同降雨条件下蔬菜地沟渠径流氮浓度(TN和DN)高于大棚和玉米地沟渠;而大棚沟渠的径流磷含量(TP和DP)则高于蔬菜地和玉米地沟渠(表4)。露天农田由于没有

其中降雨对TP与SS的影响显著( $P < 0.01$ ),由于不满足协方差分析基本条件,因此只对TN、DN、DP进行分析,从表3可以看出,种植方式是影响TN、DN及DP的主要因素,降雨对TN及DN同样具有显著影响,沟渠类型与种植方式的交互作用对DN与DP具有显著影响。

表2 雨季不同农田种植方式内沟渠径流不同形态氮磷比例 %

指标	1号沟渠	2号沟渠	3号沟渠	4号沟渠	5号沟渠
溶解态氮	84.7	80.6	80.9	64.9	70.9
颗粒态氮	15.3	19.4	19.1	35.1	29.1
溶解态磷	32.0	20.2	17.6	16.1	7.7
颗粒态磷	68.0	79.8	82.4	83.9	92.3

表3 影响雨季沟渠径流氮磷含量变化的协变量方差分析

变量	df	总氮	溶解态氮	溶解态磷
降雨	1	32.43**	7.77**	0.17
沟渠类型	1	0.01	2.47	2.16
种植方式	2	10.25**	29.63**	19.95**
沟渠类型×种植方式	1	2.86	8.83**	11.89**

注:\*表示在0.05水平上显著;\*\*表示在0.01水平上显著。

在同一降雨量(18.05 mm)条件下,不同种植方式及沟渠类型下径流污染物含量的比较结果见表4。对于氮素而言,蔬菜地及大棚种植区的径流的氮含量显著高于玉米地;大棚区径流的磷素含量显著高于蔬菜地及玉米地。对于沟渠而言,自然沟渠可以显著削减径流中的TP、DN及DP含量。SS含量在不同种植方式及沟渠类型下均未有显著的变化。

大棚的遮挡,降水可通过土地进行蓄存,当超过最大持水量时,即产生地下淋溶和地表径流,在此过程中,大量的氮磷随水土进行输移<sup>[9]</sup>。对氮而言,其流失主要形态为可溶解态氮,包括硝态氮和铵态氮。基于前期研究表明溶解态氮中主要形式为硝态氮,铵态氮相对较少,主要由于土壤带负电荷,对硝氮的吸附作用很小,灌溉过程中硝态氮在淋溶作用下很容易随径流流失,而铵态氮中铵离子带正电,铵态氮主要以吸附态形式吸附在土壤颗粒表面,从而使铵态氮得以保存在土壤中,只有在特定的条件下,如降雨雨强较大时,由于SS较高,铵态氮才具有较高的流失量<sup>[9,13]</sup>。而对于磷素流失而言,大棚种植区径流中磷素的流失量较高,一方面由于大棚种植区施肥量较高,另一方面

由于大棚薄膜的遮挡及对降水的再汇集,使得大棚沟渠内土壤遭受的降水冲击及降水量的影响更大,在冲刷过程中,大量颗粒态磷随径流进入沟渠,因此颗粒态磷流失是磷素输移的主要迁移方式<sup>[7-8]</sup>。

### 3.2 不同类型沟渠中氮磷流失特征

农业非点源污染物从田间产出后,在水动力作用下随径流逐级进入农田排水沟渠系统,并可能随着水动力条件的改变,在沟渠中不断沉积,为水生植物的生长和微生物的繁衍、滋生提供了充足的“营养源”,从而构成了农田排水沟渠独特的土壤-植物-微生物生态结构,具有沟渠湿地的生态功能<sup>[8,10]</sup>。农田排水流经时,由于基质底泥的吸附、植物的吸收、微生物的分解等多种作用可使其中所含的氮磷发生复杂物理、化学和生物变化,起到生态拦截、降低污染物浓度的作用<sup>[11]</sup>。因此,沟渠湿地也是目前农业非点源污染治理的重要措施之一。但是本文研究结果表明沟渠并不是影响雨季径流氮磷含量的主要因素,沟渠在削减污染物过程中的贡献较低,一方面原因是降雨及农田种植方式本身往往就是影响面源污染含量最主要的因素<sup>[15-16]</sup>,另一方面就是该区域自然沟渠生态化水平不高,对径流的截留及污染物的削减效能不是很高,从而降低了沟渠对径流污染物的影响效能。但本研究也表明在径流污染物输移过程中,相对于降雨与土地种植方式而言,沟渠对污染物含量的影响并不显著,但并不说明沟渠不具备削减面源污染的能力,当在同一降雨量条件下,该区域的自然沟渠同样可显著削减径流中的 TP、DN 及 DP 含量,这可能是底泥吸附与解吸、植物吸收和微生物同化与积累等共同作用的结果<sup>[8,12]</sup>。因此,在以后的沟渠管理中还需对不同沟渠进行定期的管理维护,提高沟渠植物的生态化水平。但必须需要注意的是土地种植方式的改善与优化仍是滇池流域面源污染控制中最重要一部分。在种植方式的优化基础上,再实现对现有沟渠的生态化水平改造,才可更为有效实现农田径流污染的控制<sup>[17]</sup>。

## 4 结论

(1)该区域径流水体氮磷超标较为严重,溶解态氮与颗粒态磷是氮磷的主要存在形态,氮磷污染符合面源污染特征;

(2)降雨是影响径流污染物含量最重要因素之一。另外种植方式对 TN、DN、DP 具有显著影响,而沟渠类型对污染物含量的影响则不显著;

(3)在同一降水量(18.05 mm)条件下,蔬菜地及大棚区的农田径流氮含量显著高于玉米地,大棚区径流的磷素含量则显著高于蔬菜地及玉米地,并且相对于土质沟渠,自然沟渠可以显著降低径流中的 TP、DN 及 DP 含量。

(4)土地种植方式的改善与优化仍是滇池流域面

源污染及水土流失控制中最重要的一部分。在种植方式的优化基础上,提高自然沟渠的生态化水平,才可更为有效的实现农田径流污染的控制。

### 参考文献:

- [1] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2011. 53-54.
- [2] 全为民,严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报,2002,22(3):291-299.
- [3] 姜翠玲,范晓秋,章亦兵. 非点源污染物在沟渠湿地中的累积和植物吸收净化[J]. 应用生态学报,2005,16(7):1351-1354.
- [4] 杨林章,周小平,王建国,等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志,2005,24(11):1371-1374.
- [5] Borin M, Bonait G, Giardini L. Controlled drainage and wetlands to reduce agricultural pollution: A lysimetric study[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(4):1330-1340.
- [6] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico [J]. *Nature*, 2000, 403(6771):758-761.
- [7] 姜翠玲,范晓秋,章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N、P 的吸收及二次污染防治[J]. 中国环境科学,2004,24(6):702-706.
- [8] 李强坤,胡亚伟,孙娟,等. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报,2010,18(1):210-214.
- [9] Chung S O, Kim H S, Kim J S. Model development for nutrient loading from paddy rice fields[J]. *Agriculture Water and Management*, 2003, 62(1):1-17.
- [10] Gill S L, Spurlock F C, Goh K S, et al. Vegetated ditches as a management practice in irrigated alfalfa[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 144(1):261-267.
- [11] 陆琦,马克明,卢涛,等. 三江平原农田渠系中氮素的时空变化[J]. 环境科学,2007,28(7):1560-1566.
- [12] 翟丽华,刘鸿亮,席北斗,等. 沟渠系统氮、磷输出特征研究[J]. 环境科学研究,2008,21(2):35-39.
- [13] 朱利群,夏小江,胡清宇,等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):6-10.
- [14] 吴晓妮. 滇池流域不同类型农田沟渠对氮磷的截留与去除效应[D]. 昆明:云南大学,2013.
- [15] 焦平金,许迪,王少丽. 汛期不同作物种植模式下地表径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报,2009,23(2):15-20.
- [16] 李恒鹏,金洋,李燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. 水土保持学报,2008,22(2):6-9.
- [17] 金洁,杨京平. 从水环境角度探析农田氮素流失及控制对策[J]. 应用生态学报,2005,16(3):579-582.