

饮马河流域伊通河下游滨河农田非点源污染负荷估算

张刚, 王咏*, 王娟红, 江静, 王肇钧

(东北师范大学环境学院, 长春 130117)

摘要: 饮马河是松花江中上游重要支流, 伊通河为饮马河支流。为研究掌握伊通河下游河段(农安片区)滨河农田土壤侵蚀以及面源污染负荷特征, 于2015年4~10月, 在流域内的伊通河干流及其支流新开河、中央排水干渠和二道沟的河道两侧设置10处采样点, 选取pH值、有机质、碱解氮和速效磷指标, 采用田间试验和通用土壤流失方程USLE相结合方法, 逐月测定上述4指标的田间含量, 并估算土壤侵蚀量和氮磷污染输出负荷。研究表明: 2015年研究流域内土壤有机质、碱解氮和速效磷含量依次为(11.05±8.08)~(21.14±22.81)g/kg、(119.812±53.955)~(205±161.287)mg/kg和(9.78±5.88)~(33.03±24.99)mg/kg; 在4~10月春夏秋季节, 上述三指标以及土壤pH值均存在“高-低-高”较为明显的“U”型变化趋势。土壤侵蚀强度均值为3.2982 t/hm²; 其中7月份的土壤侵蚀量为2.48 t/hm², 占到全年的75.19%; 其强度大小以及变化趋势均由年内降雨量的分布多寡所决定。农田面源污染负荷中碱解氮和速效磷的总负荷依次为214.985 kg/hm²、10.219 kg/hm², 其中固态及溶解态碱解氮和速效磷依次为102.57 kg/hm²、112.415 kg/hm²和0.14 kg/hm²、10.079 kg/hm²; 溶解态氮磷分别是悬浮态氮磷的1.1倍和72倍, 是面源输出中主要部分。此外, 固态的有机质输出水平为102.092 kg/ha。

关键词: 伊通河; 土壤侵蚀; 氮磷; 农田; 面源

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1003-8701(2017)03-0014-09

Estimation of Non-Pointed Source Pollution Load in the Farmlands along the Riverside of the Yitong River in Yinmahe Basin

ZHANG Gang, WANG Yong*, WANG Juanhong, JIANG Jing, WANG Zhaojun

(School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

Abstract: Yinma River is an important tributary of middle and upper reaches of Songhua River, with Yitong River as the tributary. In order to gain the characteristics of erosion and the load of non-point source pollution in riverside farmlands around downstream of Yitong River (within Nong'an Area), the related research was conducted between April and October, 2015, in which the field contents of pH value, organic substance, available nitrogen and available phosphorus were measured in each of successive months in the 10 sample collection points set on both sides of the mainstream of Yitong River basin and its tributary Xinkai River, the central arterial drainage and Erdaogou, through the methodology of field trial in combination of general USLE. Besides, the erosion amount and nitrogen and phosphorus pollution output load were also estimated subsequently. The results showed that in 2015, soil contents of organic substance, available nitrogen and available phosphorus were(11.05±8.08)–(21.14±22.81)g/kg, (119.812±53.955)–(205±161.287)mg/kg and (9.78±5.88)–(33.03±24.99)mg/kg. During summer and autumn (April–October), the three above-mentioned indexes and the soil pH value demonstrated a distinct U-shaped variation trend with average erosion intensity value of 3.2982 t/ha. The soil erosion intensity value was 2.48 t/ha in July, taking up 75.19% of the whole year, whose intensity and variation trends were depended on the rainfall distribution within the year. The overall loads of available nitrogen, available phosphorus in field non-point pollution were 214.985 kg/ha and 10.219 kg/ha, respectively, among which, the solid available nitrogen and available phosphorus were 102.57 kg/ha and 112.415 kg/ha and the dissolved ones were 0.14 kg/ha and 10.079 kg/ha, separately. The amounts of the dis-

收稿日期: 2017-02-12

基金项目: 国家-水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-011); 吉林省教育厅项目(自然科学)(JJKH20170922KJ)

作者简介: 张刚(1978-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为生物地球化学、面源污染及防治。

通讯作者: 王咏, 女, 博士, 副教授, E-mail:wangy833@nenu.edu.cn

solved nitrogen and phosphorus were 1.1 and 72 times that of suspending ones, thus becoming the main output of non-source point. In addition, the solid organic substance output was 102.092 kg/ha.

Key words: Yitong River; Soil erosion; Nitrogen and phosphorus; Farmland; Non-point source

面源是水环境质量恶化的重要污染源,是水难以彻底改善和恢复的主要因素^[1-4]。至20世纪末,全球范围约有30%~50%的地表水体受到面源污染的影响。农业面源污染造成美国40%的湖泊和河流水质退化、地下水污染以及湿地退化,也是欧洲水体,特别是地下水硝酸盐污染的首要来源以及地表水中磷富集的最主要原因,据统计,由农业面源排放的磷为地表水污染总负荷的24%~71%^[5-6]。20世纪80年代以来我国逐渐认识到面源(非点源)污染问题的重要性,农业面源污染研究方兴未艾。我国以不到世界10%的耕地供养着世界22%的人口,土地资源开发已经接近极限。据调查我国化肥平均使用率仅30%左右,流失的化肥农药已经成为我国当前农业面源污染的主要污染源之一^[7]。土壤侵蚀是面源污染的重要组成部分,掌握流域内农田土壤侵蚀特征是进行区域面源污染防治的前提和基础。

松花江是我国七大水系之一,饮马河与伊通河汇合后注入第二松花江。本研究所涉及的伊通河流域,从源头到新立城水库(长春市主城区水源地)大坝为上游;从新立城水库大坝到新开河口为中游(贯穿长春市主城区);从新开河口到靠山屯为下游,详见图1。伊通河下游两岸遍布村屯,河岸带掏蚀严重,河槽“U”型为主,且堤坝内外滨河岸带几乎均被垦殖耕作,河槽来水主要为中游大型城市(长春市主城区)经处理过的污水及暂未纳入管网的各类排水和本段各类农业生产生活退水及面源汇入。

研究掌握伊通河下游河段土壤侵蚀特征,是饮马河流域综合治理的基础。故本研究通过野外实验连续监测了伊通河下游农安县段两侧滨河岸带上耕作农田土壤有机质、碱解氮和速效磷的时空分布特征,基于通用土壤流失量方程(USLE),初步估算该小流域河段内土壤侵蚀强度特征,希望本研究能够为我国耕作方式类似,流域特征相近地区的农业面源污染防治、岸带水土保持以及河流综合整治等工作提供基础数据参考和设计、施工等依据。

1 区域概况及研究方法

1.1 区域概况

伊通河是第二松花江的二级支流,发源于吉林省伊通县境内哈达岭山脉青顶山北麓,流经伊通县、长春市、德惠市、农安县,主要支流(由南往北)有小伊通河、干沟子河、双庙子河、伊丹河、碱草沟、小河沿子河、西河沟(繁荣路-南湖-动植物园-吉顺明沟)、东新开河、四间河(即串库)、新凯河、农安排水干渠(也常称为中央排水干渠)、两家子河、小苇子沟、大苇子沟等,在农安县靠山镇靠山大桥下5 km与饮马河汇合,从河源至汇合处流程343.5 km,沿程是为伊通河流域,流域水系分布详见图1。

流域下游农安县南临长春,属长春市管辖,年均气温4.7℃,无霜期145 d,降水量507.7 mm,有效积温2 800℃·d,地势平坦,四季分明,属中温带大陆性气候。据2013年统计,县辖区人口120万,粮食产量45亿kg,畜禽饲养量2.3亿只(头),畜禽饲养业发达。伊通河由南至北穿城而过,两侧冲积湖积的河谷平原广泛发育。

研究所选择伊通河下游段,由新开河入伊通河河口处干流段始,依次涉及支流新开(凯)河、农安县域内中央排水干渠、二道沟河以及伊通河干流农安县城区段,区段流域内农业生产生活强

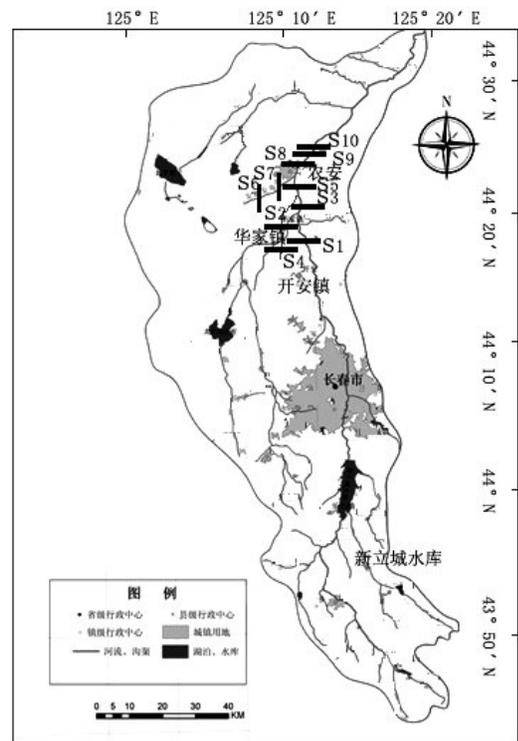


图1 伊通河流域及本研究采样点设置概况

度大,滨河岸带上农业种植现象普遍,土壤侵蚀作用强烈,农业生产生活所致面源污染进一步加剧了伊通河下游河水污染问题。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点设置及样品分析

为研究掌握目标河段滨河耕作农田土壤中pH值、有机质、碱解氮和速效磷的时空分布特征,沿河依次设置了10处采样点,详细见图1和表1,其中伊通河干流河段约20 km,由南至北依次设置6处采样点,即S1、S3、S5、S8、S9和S10,支流新开河上1处采样点,即S2,支流中央排水干渠上1处,即S4,支流二道河上2处采样点,即上游S6和河口S7。各断面采样时现状见表1中概况描述。

2015年4~10月,即流域内非冰封冰冻期间,于每月中旬,至各样点处进行土壤采样,沿河岸向两侧集水区内选择100 m×100 m范围设置采样地块,于地块内按照“之”字形布点,采集地表0~15 cm土壤,地块内一般不少于40个取土点,将所有样点土于现场混合均匀后,四分法缩减至约2 kg,于密封袋内封存,带回实验室进行处理和分析。

样品土壤经风干后,过筛,进行pH值(玻璃电极法;雷磁PHSJ-4A)、有机质(油浴-重铬酸钾氧化法)、碱解氮(硼酸吸收-扩散皿法)和速效磷(NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法)检测,各样点每个指标测试5个平行样品,取均值作为最终结果。

表1 研究区域采样点布设情况及采样时现状概况

序号	样点名称	概况
S1	新开河入前伊通河 S ₁	U型河槽。两岸均为成片玉米田。土壤为灰色冲积土。
S2	入伊通河前新开河 S ₂	W型河槽。两岸均为成片玉米田。土壤为灰色冲积土。
S3	新开河入后伊通河 S ₃	U型河槽。两岸均为成片玉米田。土壤为灰色冲积土。
S4	入伊通河前中央沟渠 S ₄	W型河槽。两岸均为成片玉米田。土壤为黑钙土。
S5	中央沟渠入后伊通河 S ₅	U型河槽。两岸均为成片玉米田。土壤为灰色冲积土。
S6	二道河上游 S ₆	V型河槽。两岸杂草地。土壤黑钙土,有生活垃圾堆积。
S7	入伊通河前二道河 S ₇	V型河槽。两岸均为成片玉米田。土壤为黑钙土。
S8	伊通河黄龙府大桥 S ₈	W型河槽。左岸杂草地;右岸成片玉米田。土壤为黑钙土。
S9	农安县污水处理厂排水口前 S ₉	U型河槽。左岸杂草地;右岸成片玉米田。土壤为灰色冲积土。
S10	农安县污水处理厂排水口后 S ₁₀	U型河槽。左岸杂草地;右岸成片玉米田。土壤为灰色冲积土。

1.2.2 土壤侵蚀估算方法

本研究中的小流域属冲积湖积平原,20世纪80年代以来,伊通河下游两侧农安片区水田改种玉米,除毗邻城区地带正在进行城镇化,其余均为较均质旱田。区域内土壤主要为黑土、黑钙土、草甸土、风砂土、冲积土;其中滨河地带一般为黑钙土和冲积土分布^[8-9]。

本研究选用美国环保局提供的计算方法(非城市区非点源污染负荷方法)计算研究流域河段内面源污染负荷量,所涉及公式表达方式各有不同,本次采用《湖泊富营养化调查规范》^[10]上所给出的形式:

(1)土壤流失量。是估算土壤流失的最常用的估算式,如下:

$$X = 1.29 \times E \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \dots\dots\dots(式1)$$

其中:X为单位面积土壤侵蚀量(t/hm²);E为降雨/径流侵蚀系数((10²m·t·cm)/(hm²·h));K为土壤侵蚀性参数(t/(hm²·单位E));L·S为地形参数;C为植被覆盖因子;P为管理参数。

(2)污染物负荷。如下:

其中,固态污染物的负荷计算依据:

$$L_s = 0.001 C_s X \dots\dots\dots(式2)$$

其中:L_s为径流中的固态污染物负荷(kg/hm²);X为土壤侵蚀量(t/hm²);C_s为流失物中污染物的浓度(mg/kg)。

而溶解态污染物的负荷计算依据:

$$L_d = 0.1 C_d \cdot Q \dots\dots\dots(式3)$$

其中:L_d为径流中溶解态污染物负荷(kg/hm²);C_d为径流中溶解态污染物浓度(mg/L);Q为径流量(cm)。

(3)年径流量计算:

SCS径流深度计算公式以一次降雨量为主要参数,确定径流深度Q^[11-12]。

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \dots\dots\dots(式4)$$

式中:Q:径流量(cm);P:降水量(cm);S:滞留参数;上面公式适用范围是P>0.2S。

式4中,S可由CN求得:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \dots\dots\dots(式5)$$

其中:CN为SCS方程中径流曲线数值,和土

壤类型、土地使用、管理措施以及土壤含水率等因素有关,它表示一次降水过程中地面水文条件。

本研究按实际情况查表可知,农田中为直行种植,CN值选定83,而杂草地选定71^[13]。将CN值带入式5计算可知,旱田当 $P>10.4\text{ mm}$ 时,杂草地 $P>20.7\text{ mm}$ 时,才能满足式4的使用条件,即才会产流。

2 结果与讨论

2.1 小流域滨河农田土壤氮磷及有机质时空分布

2.1.1 土壤有机质及pH值

土壤酸碱度对土壤肥力和植物生长影响很大,我国北方地区土壤pH值一般较大。伊通河农安片区小流域本研究涉及各样点2015年4~10月土壤pH值测量结果见表2,由表2可知所有土

壤样点pH值均在6~8.5之间变化,且随着月份变化呈现出一定的规律性,即在区域内春季4~5月份土壤偏碱性,夏季6~8月份降水较为集中时段,土壤pH值较为明显变小,呈现一定酸性,秋季9~10月份,又转变为偏碱性的规律特征。

究其原因,应该是在春季,农田土壤经翻耕后,土壤中盐基成分,在北方干旱地区不容易淋失,而底层的盐基又随水分蒸发上升而累积在土壤表层中,使土壤反应偏碱性,随着夏季雨水逐渐增加,尤其是6~8月份集中了全年70%~80%的降水,土壤之中一、二价阳离子组成盐类大量被淋失,被地表径流携带迁移,剩下的三价的铁铝等化合物尤其是铝的氧化物及其盐类在水中水解产生氢离子,致使土壤变酸^[14-15],至秋季,天气晴朗,蒸发量明显大于降雨量,底层土壤盐分随水分运动并累积在土壤表层,使土壤又呈现偏碱性特征。

表2 2015年4~10月各样点土壤pH值变化统计

统计值	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
最小值	6.007	6.505	6.163	6.362	6.516	6.776	6.081	6.715	6.995	6.452
最大值	7.451	7.798	7.872	7.619	7.855	8.057	7.757	8.221	7.871	7.105
均值	7.026	7.232	7.095	6.962	7.342	7.236	6.994	7.288	7.367	6.909
方差	0.559	0.517	0.731	0.498	0.542	0.557	0.669	0.674	0.402	0.278

土壤有机质是指存在于土壤中的所含碳的有机物质,包括各种动植物的残体、微生物体及其会分解和合成的各种有机质,土壤有机质是土壤固相部分的重要组成成分,尽管土壤有机质的含量只占土壤总量的很小一部分,但它对土壤形成、土壤肥力、环境保护及农林业可持续发展等方面都有着极其重要的作用和意义。土壤有机质的含量在不同土壤中差异很大,含量高的可达20%或30%以上(如泥炭土,某些肥沃的森林土壤等),含量低的不足1%或0.5%(如荒漠土和风沙土等)。

本研究所测各样点土壤有机质时空分布规律见表3,由表3可知,所研究区域土壤有机质年内平均值为 $(11.05\pm 8.08) \sim (21.14\pm 22.81)\text{ g/kg}$,这低于吕岩等^[16]报道的吉林省玉米主产区土壤有机质平均含量 19.50 g/kg 以及冲积土有机质平均含量 22.37 g/kg ,但与报道中黑钙土样本土壤有机质含量 15.68 g/kg 相当。此外,在4~10月间各段有机质均值呈现出“高一低一高”的“U”型变化趋势,但是8月份比7月份明显提升4倍左右,此后秋季的9~10月份又趋近于春季的4~5月份水平。

分析上述现象原因,所研究滨河两岸农田位于河岸带上,是陆域生态系统和水域生态系统之间的过渡带,往往是各类物质迁移的中转地,研究区域农田一般为漫滩地上由农户自主开发,自负盈亏,靠天吃饭,管理水平不高,现场考察发现区域土壤侵蚀过程明显,水土流失现象普遍,且近年来水患问题突出,如2013年流域性洪水,滨河岸耕作带曾全部淹没,导致绝收。分析该区域耕作层有机质含量宽幅震荡现象,原因可能有二,其一,该部分田地不是责任田,只种不养,粗放管理,导致土壤有机质总体水平趋于降低;其二,则是雨季集中的降雨径流造成田块表层土壤流失过程显著,地表径流驱动土壤颗粒由岸带向河道横向迁移以及沿着岸带纵向迁移,即对研究地块而言,有输入有输出;而在田块内部,有侵蚀有堆积;总体上,空间格局变化明显。如徐香菇等^[17]研究报道,长期施肥可致土壤有机碳及氮素等明显增加,且表层增量明显高于亚表层;频繁的表层土壤扰动,致使土壤有机质含量变异明显。本研究中显然河岸带上明显的表层土壤侵蚀过程,即迁移特征导致局域内土壤有机质含量重

新分布呈现常态化,所以出现较为少见的区别于普通农田的表层土壤有机质年内宽幅变化现象;但这与王育来等^[18]报道的上海地区滨河带农田土壤有机质、有机碳以及溶解性有机碳的迁移与变

化规律是相一致的。另外,土壤有机质含量U型变化特征,即在8、9月份明显增高的现象,可能是高温高湿条件下土壤微生物生命活动旺盛,生物量显著增加所致。

表3 2015年4~10月间各样点土壤有机质含量统计

统计值	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
最小值	4.83	5.66	5.23	4.81	4.80	8.78	2.33	3.31	3.46	10.56
最大值	68.33	21.57	70.69	69.73	26.36	20.22	24.02	24.73	33.23	18.99
均值	19.69	12.96	20.03	21.14	11.05	12.44	12.48	13.56	16.28	15.14
方差	22.31	5.30	22.89	22.81	8.08	4.78	6.97	8.83	9.04	3.19

2.1.2 土壤碱解氮

土壤水解性氮也称碱解氮、有效氮,能反映土壤近期内氮素供应情况,包括无机态氮(铵态氮、硝态氮)及易水解的有机态氮(氨基酸、酰胺和易水解蛋白质)。土壤有效氮量与作物生长关系密切,因此它在推荐施肥中意义更大^[19]。本研究检测的各样点土壤碱解氮含量结果见表4,可知,伊通河研究河段内土壤碱解氮含量水平均值为 $119.812 \pm 53.955 \sim 205.000 \pm 161.287$ mg/kg,明显高于吕岩等^[16]报道的吉林省玉米主产区土壤碱解氮

平均含量108.87 mg/kg,但在所报道的样本浓度分布区间15.10 mg/kg ~ 405.00mg/kg内;各样点逐月的分布规律也呈现与有机质相似的分布特征,即“高一低一高”的U型分布规律,同样,也在8月份,土壤碱解氮有明显提升的过程。

究其原因,碱解氮的变化规律亦与有机质变化规律类似,即既有农作物不同生长阶段需求的影响,也有人为管理农田的干扰,从而导致出现上述明显的U型规律性分布趋势。

表4 2015年4~10月各样点土壤碱解氮含量统计值

统计值	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
最小值	75.191	17.056	17.767	8.919	44.789	87.560	42.380	61.520	13.997	69.458
最大值	655.558	183.354	538.345	521.940	212.369	273.420	274.071	228.371	328.104	180.451
均值	199.920	119.812	162.140	205.000	129.234	158.63	155.343	132.792	144.654	147.440
方差	210.055	53.955	186.819	161.287	54.391	74.889	74.480	51.096	97.811	39.887

2.1.3 土壤速效磷

有效磷,也称为速效磷,是土壤中可被植物吸收的磷组分,包括全部水溶性磷、部分吸附态磷及有机态磷,有的土壤中还包括某些沉淀态磷。土壤中有效磷含量状态指能被当季作物吸收的磷量,了解土壤中有效磷的供应状况,对于施肥有着直接的意义,在农业生产中一般采用土壤有效磷的指标来指导施用磷肥,土壤有效磷含量是决定磷肥有无效果以及效果大小的主要因素^[20-21]。所研究区域内土壤速效磷的检测结果见表5,由其可知,伊通农安片区内土壤速效磷含量为 $9.78 \pm 5.88 \sim 33.04 \pm 24.99$ mg/kg,这与吕岩等^[16]研究报道的吉林省玉米主产区土壤有效磷平均含量21.45

mg/kg相当;在时间分布上也呈现出同有机质和碱解氮的类似分布规律,即“高一低一高”的U型的变化规律。

究其原因,所研究区域农田土壤速效磷也主要来源于农户所施用的氮磷钾肥,农作物的生长需求,农田人为管理以及雨季地表径流携带迁移等共同影响了土壤速效磷含量的时间和空间分布规律,春季耕种时的底肥以及夏末的追肥是土壤速效磷增加的最主要原因,而土壤侵蚀和面源输出以及作物生长需求是速效磷降低的主要原因,多因素共同作用导致出现上述明显的土壤含量变化规律。

表5 2015年4~10月各样点土壤速效磷含量统计值

mg/kg

统计值	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
最小值	4.73	6.42	0.58	0.17	4.46	6.54	16.6	6.75	3.83	6.69
最大值	43.83	28.08	46	17.02	28.08	39.65	51	69.75	57.67	32.25
均值	16.97	14.10	21.37	9.78	17.91	26.50	31.47	33.04	20.68	19.96
方差	13.15	6.77	14.94	5.88	9.43	11.68	12.92	24.99	18.53	8.70

2.2 研究河段土壤侵蚀及面源污染负荷估算

关于E值,根据小流域2015年逐月降雨量统计值计算可得,见表6。研究流域冬季存在明显积雪,该部分融雪侵蚀不参与本次计算。

2.2.1 土壤侵蚀量估算

使用USLE估算目标区域土壤侵蚀量,首先应逐个确定式1中各参数取值。

表6 2015年小流域降雨量P(mm)和降雨/径流侵蚀指数E(10²m·t·cm)/(hm²·h)统计及计算结果

参数	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	总数
Pi	11.5	61.1	82.3	194.3	69.1	10	16.2	444.5
Ei	0.043	6.417	15.678	206.205	9.296	0.028	0.119	237.786

表7 土壤侵蚀参数K取值

土壤质地	有机质含量(%)		
	5	20	40
砂质壤土	0.27	0.24	0.19
粉砂土	0.60	0.52	0.42

关于参数K的取值,根据文献10及表3中各样点有机质当月含量可以确定,确定方式参见表7,实地勘察发现所研究小流域土壤质地一般为砂质壤土和粉砂土。

关于地形参数LS,依据实地勘察,各样点所在区域坡度角≤3%,根据各地块实测坡度,计算可得相应值,见表8。

表8 各断面参数LS计算结果

参数	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
LS	0.656	2.598	0.656	2.598	0.656	2.598	2.598	0.656	0.656	0.656

关于C值,玉米在不同生长期,即土壤翻耕期、播种期、苗期、成熟期和收获期(留茬和不留茬)各阶段的C值依次为0.15、0.40、0.33、0.15、0.22和0.45。且植被类型为杂草地时,覆盖率为20%、40%、60%、80%和100%时,C值依次为0.24、0.15、0.09、0.043和0.011。

12.1~18和18.1~24,P值依次选取0.60、0.50、0.60、0.80和0.90。且计算流失量时,等高有垄种植时,P值应该乘以0.2。如无任何水土保持措施时,P值取1.0。

关于P值,玉米田为等高带状种植,属于行种春种谷类,故按坡度(%)1.1~2、2.1~7、7.1~12、

根据上述参数确定原则,确定各参数,依次带入式1进行计算,获得研究流域内各样点土壤侵蚀量,见表9。

表9 各样点土壤流失量计算结果统计

t/hm²

样点	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	X(全年)
S1	0.0003275	0.1303	0.2627	1.5705	0.04956	0.0001848	0.001329	2.0267
S2	0.001556	0.6194	1.2484	2.8728	0.3365	0.001013	0.005475	5.0851
S3	0.0003275	0.1303	0.2627	1.5705	0.04956	0.002133	0.001329	2.0168
S4	0.0007004	0.2787	0.5618	3.3586	0.1065	0.0004054	0.002843	4.3095
S5	0.0003275	0.1303	0.2627	1.5705	0.06136	0.002133	0.001329	0.0286
S6	0.009338	1.3936	2.1280	8.0234	0.3215	0.001089	0.01615	11.8931
S7	0.001556	0.2787	0.5618	3.3586	0.1065	0.0004054	0.002843	4.3104

续表 9

样点	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	X(全年)
S8	0.0001916	0.04692	0.08597	0.4547	0.01822	0.00005488	0.0005030	0.6066
S9	0.0004257	0.1043	0.1910	1.0103	0.04555	0.0001372	0.0009688	1.3527
S10	0.0004257	0.1043	0.1910	1.0103	0.04555	0.0001372	0.001118	1.3528
流域均值	0.001518	0.3217	0.5756	2.4800	0.1141	0.000769	0.003389	3.2982

综上,根据式 1,计算可得各样点年内月均以及流域各月均值的土壤侵蚀量强度,详见表 9,2015 年研究流域内土壤侵蚀强度均值为 3.2982 t/hm^2 ;7 月份的土壤侵蚀量为 2.4800 t/hm^2 ,占到全年的 75.19%;土壤侵蚀的根本原因是降水所引起,其强度大小以及变化趋势均与年内降雨量的分布密切相关,二者呈现高度一致;也就是说,降雨是堤岸带土壤侵蚀的原动力。怡凯等^[22]使用 RUSLE 模型研究了辽宁省朝阳市 2001~2010 年的土壤侵蚀时空分异特征,结果表明,研究流域土壤侵蚀模数达到最低为 $254.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,最高可达 $747.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这明显高于本研究流域 2015 年土壤侵蚀量强度范围的 $0.0286 \text{ t/hm}^2 \sim 11.8931 \text{ t/hm}^2$,可见,与毗邻的辽宁省相比,饮马河伊通河小流域堤岸带农田土壤侵蚀强度水平尚处于较低水平。潘美慧等^[23]基于 USLE 对东江流域年均土壤侵蚀量进行估算,土壤侵蚀模数为 $18.73 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,也明显高于本流域。徐艳杰等^[24]对华北平原的土壤侵蚀状况进行分析,其多年平均土壤侵蚀模数为 $2674.26 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,最大值可达 $8302.11 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,也明显高于本流域。陈思旭等^[25]使用 RUSLE 模型对南方丘陵山区 4 个主要省份—湖南、江西、浙江和福建的土壤侵蚀状况进行定量研究,表明研究区域的平均土壤侵蚀模数为 $421.81 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,这与本研究所涉及流域的 $3.2982 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 相当,但本研究降雨量仅约为南方 4 省份的一半,因此估算本研究区土壤侵蚀强度可能要略大于上述南方地区。已有诸多研究表明,土壤侵蚀强度方面,本研究流域尚处于较弱水平,但因地块濒临河槽的特殊性,也应引起各方面的高度关注。

由于土壤侵蚀,导致耕地沟壑日益加剧,土层变薄,地块支离破碎,耕地面积不断缩小,大量肥沃表土流失,土壤肥力和植物产量迅速降低。如吉林省黑土地地区,每年流失的土层厚达 $0.5 \text{ cm} \sim 3 \text{ cm}$,肥沃的黑土层不断变薄,有的地方甚至全部侵蚀,使黄土或乱石遍露地表^[26]。

并且,尤其是滨河地带的农田因水土流失带走的大量泥沙,被送进河道造成河床淤塞、抬高,

引起河流泛滥,这是平原地区发生特大洪水的主要原因,同时大量泥沙的淤积还会造成大面积土壤的次生盐渍化^[27]。更为突出的问题是,进入地表水体的被侵蚀的耕作土,本身携带大量的有机质和氮磷等营养物质,这成为农业面源污染负荷的重要组成部分,进一步导致河流水质恶化,本研究的目标河段,伊通河下游河道承接的主要是中上游区域大型城市长春市主城区排放的污水,该部分水叠加了本段农安片区的农业生产生活排水以及面源汇入,水质进一步恶化,伊通河入饮马河,终入松花江,见微知著,由此可见,中小河道的面源污染是大江大河水体污染、水质恶化的重要贡献源,从源头开始整治才是河流污染防治治标又治本的根本策略。

2.2.2 面源污染物负荷计算

基于研究目标小流域 2015 年土壤侵蚀强度,结合式 2、式 3 和式 4,可计算得到流域当年径流深,详见表 10,此外,根据文献 10,对河段内农田面源污染负荷进行估算,结果表明,研究流域内农田(玉米田)面源污染负荷中,迁移的固态有机质、碱解氮和速效磷依次为 102.092 kg/hm^2 、 102.57 kg/hm^2 和 0.14 kg/hm^2 ;溶解态的碱解氮和速效磷依次为 112.415 kg/hm^2 、 10.079 kg/hm^2 ;碱解氮和速效磷的面源输出总负荷依次为 214.985 kg/hm^2 、 10.219 kg/hm^2 。因未对溶解在径流中的有机质进行有效检测,且溶解性有机质成分复杂^[28],故本研究不对该值(溶解态)进行估算,另有论文专行讨论。郭祥等^[29]报道了东江湖流域耕地吸附态氮素流失模数为 $1.58 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,吸附态磷素的流失模数为 $0.42 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,可见,相比而言,本研究流域氮磷流失水平尚低,但考虑到滨河耕地系统的生态脆弱性的客观特点,该小流域的面源污染负荷问题不容忽视。

根据表 10 可知,研究流域内,溶解态的碱解氮约为悬浮态的 1.1 倍,而溶解态的速效磷约为悬浮态的 72 倍。可见在面源输出过程中,溶解态和悬浮态的有效态氮贡献相当,而溶于径流而进入水相的磷占据主要部分,显然该部分滨河农田所

致农业面源严重影响了伊通河水质改善,是其下游水质进一步恶化的重要作用原因。因此,在国家科技重大专项“水体污染控制与治理科技重大

专项”的十二五、十三五期间,对中小河道流域内农业面源进行综合整治^[30-31],是实现污染控制指标,明显改善水质的重要工作和有效手段。

表 10 研究流域河段内农田污染物负荷计算结果

污染物强度负荷	X(t/hm ²)	Q(cm)	Ls(kg/hm ²)	L ₀ (kg/hm ²)	Ls+L ₀ (kg/hm ²)
有机质			102.092	/	102.092
碱解氮	3.2982	387.6388	102.57	112.415	214.985
速效磷			0.14	10.079	10.219

3 结 论

根据上述研究,可以获得如下明确的结论,2015年研究流域内:

(1)土壤有机质、碱解氮和速效磷含量依次为 $11.05\pm 8.08 \sim 21.14\pm 22.81$ g/kg、 $119.812\pm 53.955 \sim 205\pm 161.287$ mg/kg和 $9.78\pm 5.88 \sim 33.03\pm 24.99$ mg/kg;在4~10月春夏秋季节,上述三指标存以及土壤pH值均存在“高一低一高”较为明显的U型变化趋势。

(2)土壤侵蚀强度均值为3.2982 t/ha;其中7月份的土壤侵蚀量为2.48 t/ha,占到全年的75.19%;其强度大小以及变化趋势均由年内降雨量的分布多寡所决定。

(3)农田面源污染负荷中碱解氮和速效磷的总负荷依次为214.985 kg/ha、10.219 kg/ha,其中固态及溶解态碱解氮和速效磷依次为102.57 kg/ha、112.415 kg/ha和0.14 kg/ha、10.219 kg/ha;溶解态氮磷分别是悬浮态氮磷的1.1倍和72倍,是面源输出中主要部分。此外,固态的有机质输出水平为102.092 kg/ha。

参考文献:

- [1] Knisel W G. Systems for evaluating nonpoint source pollution: An overview[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1982, 24(2-3): 173-184.
- [2] 王 媛,张 刚,张 蕾,等.吉林省西部新增盐碱水田排水污染物负荷特征研究[J].吉林农业科学,2013,38(2): 87-91,96.
- [3] Diebel M W, Maxted J T, Robertson D M, et al. Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution reduction III. Assessing phosphorus and sediment reduction potential[J]. Environmental Management, 2009, 43(1): 69-83.
- [4] 王良民,王彦辉.植被过滤带的研究和应用进展[J].应用生态学报,2008,19(9):2074-2080.
- [5] Dennis L C, Peter J V, Keith L. Modeling non-point source pol-

- lution in vadose zone with GIS[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(8): 2157-2175.
- [6] Miller G T. Living in the Environment: An Introduction to Environmental Science[M]. Seventh Edition Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992: 602-611.
- [7] 王 媛,张 刚,朱显梅,等.吉林省西部新增灌区水田非点源污染负荷估算[J].环境科学与管理,2012,37(4):35-39.
- [8] 阎百兴.农业非点源污染研究[D].长春:吉林大学,2004: 15-25.
- [9] 杨育红,闫百兴.中国东北地区非点源污染研究进展[J].应用生态学报,2010,21(3):777-784.
- [10] 刘鸿亮.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1989:282-299.
- [11] 吴林祖.一种城市径流量的计算方法-径流曲线数值方程(CNE)[J].上海环境科学,1987,6(12):39-41.
- [12] V Novotny, G Chesters. Hand book of non-point Pollution sources management [M]. New York: VNR Company, 1981: 81-103.
- [13] 张雪花,侯文志,王 宁.东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子C值的研究[J].农业环境科学学报2006,25(3):797-801.
- [14] 张 晶,濮励杰,朱 明,等.如东县不同年限滩涂围垦区土壤pH与养分相关性研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):225-230.
- [15] 范庆锋,张玉龙,陈 重,等.保护地土壤盐分积累及其离子组成对土壤pH值的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):16-20.
- [16] 吕 岩,吴景贵,黄 健,等.吉林省玉米主产区土壤肥力研究[J].吉林农业科学,2013,38(4):33-37.
- [17] 徐香菇,骆 坤,周宝库,等.长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J].应用生态学报,2015,26(7): 1961-1968.
- [18] 王育来,孙即梁,杨长明,等.河岸带土壤溶解性有机质垂直分布特征及其性质研究[J].农业环境科学学报,2013,32(12):2413-2421.
- [19] 韩秉进,张旭东,隋跃宇,等.东北黑土农田养分时空演变分析[J].土壤通报,2007,38(2):238-241.
- [20] 张水勤,王峰源,姜慧敏,等.设施菜地土壤中速效磷是微生物有效性的关键调控因子[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1721-1727.
- [21] 张 丽.长期施肥黑土有效磷演变与磷平衡关系及其机理

- [D].北京:中国农业科学院,2014:1-5.
- [22] 怡凯,王诗阳,王雪,等.基于RUSLE模型的土壤侵蚀时空分异特征分析—以辽宁省朝阳市为例[J].地理科学,2015,35(3):365-372.
- [23] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等.基于USLE的东江流域土壤侵蚀量估算[J].自然资源学报,2010,25(12):2154-2164.
- [24] 徐艳杰,姚志宏,赵东保.基于RS/GIS和RUSLE的华北平原土壤侵蚀现状分析[J].水土保持通报,2012,32(6):217-221.
- [25] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于RUSLE模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- [26] 刘瑞民,王嘉薇,张培培,等.大伙房水库控制流域土壤侵蚀评价及其影响因素分析[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1597-1601.
- [27] 李发鹏,李景玉,徐宗学.东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J].水土保持研究,2006,13(3):50-54.
- [28] 何伟,白泽琳,李一龙,等.溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展[J].环境科学学报,2016,36(2):359-372.
- [29] 郭祥,杜蕴慧,刘孝富,等.东江湖流域农业面源污染负荷研究[J].环境工程技术学报,2013,3(4):350-357.
- [30] 俎晓东.北方地区中小河流生态治理工程建设运行[J].中国农村水利水电,2015,20(11):115-117.
- [31] 马广文,王业耀,香宝,等.长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J].农业环境科学学报,2012,31(4):791-797.

(责任编辑:王昱)