

华北半干旱区 2 个农业流域地表氮素流失特征的对比研究

陆海明^{1, 2}, 尹澄清^{2*}, 王夏晖³, 邹鹰¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国环境规划院, 北京 100012)

摘要:在 2004 和 2005 年 2 个水文年期间, 通过野外降雨径流监测和室内分析, 对位于华北半干旱地区天津市重要饮用水水源地于桥水库周边 2 个典型农业小流域地表径流氮素流失特征进行了对比研究. 结果表明, 2 个农业小流域全年氮输出主要集中在 6~9 月; 试验期间桃花寺流域 41% 的地表径流和 52% 的总氮负荷发生在 2 次 > 60 mm 降雨中, 曹各庄流域输出地表径流和总氮负荷较均匀地分布于不同降雨类型的降雨事件中; 桃花寺流域和曹各庄流域地表径流氮素输出发生的最小降雨量分别约为 20 mm 和 10 mm; 曹各庄流域和桃花寺流域年均径流系数分别为 0.013 2 和 0.001 6, 前者为后者的 8.3 倍; 曹各庄流域年均总氮输出量是 $1.048 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 桃花寺流域年均总氮输出量是 $0.158 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 前者是后者的 6.6 倍. 2 个农业流域内的微地形地貌、景观格局和迁移廊道性质的不同是造成流域氮素流失特征差异的主要原因: 受长期人为活动干扰形成的复杂地形地貌结构降低了流域的降雨-产流能力; 桃花寺流域地表径流氮素主要污染源(村庄)离受纳水体的距离约为 1 500 m, 而曹各庄流域此距离约为 200 m, 较短的迁移距离增加氮素迁移到受纳水体的风险; 曹各庄流域道路型的传输廊道可以很快地将地表径流氮素迁移到受纳水体, 而桃花寺流域地表径流氮素则可以在传输廊道中被小石坝、植被过滤带和干塘等“汇”型结构所滞留.

关键词:华北; 农业流域; 氮; 地表径流; 迁移; 景观格局; 迁移廊道

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2689-07

Comparison of Nitrogen Loss via Surface Runoff from Two Agricultural Catchments in Semi-arid North China

LU Hai-ming^{1, 2}, YIN Cheng-qing², WANG Xia-hui³, ZOU Ying¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. SKLEAC, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Nitrogen loss characteristics via surface runoff from two typical agricultural catchments into Yuqiao Reservoir-the important drinking water source area for Tianjin city in semi-arid North China were investigated through two-year in-situ monitoring and indoor chemical analysis. The results showed that annual nitrogen export mainly concentrated in the rainy period between June to September. About 41% of the annual water output and 52% of the annual total nitrogen output took place in two rainfall events with rainfall > 60 mm in Taohuasi catchment (T catchment), while the distribution of water and nitrogen export among various rainfalls in Gaogezhuang catchment (C catchment) was smooth. The rainfall thresholds for the appearance of water and nitrogen export from the outlet of T catchment and C catchment were 20 mm and 10 mm. The mean annual runoff coefficients of C and T catchments were 0.013 2 and 0.001 6, respectively. The mean annual total nitrogen exports from C catchment and T catchment were $1.048 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $0.158 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ respectively. The difference of micro-topography, landscape pattern and hydrological pathway between two catchments could explain the nitrogen export gap. Micro-topographical features created by long-term anthropological disturbance decrease the runoff generation ability. The distance between nitrogen source area and the outlet in T catchment was around 1 500 m, while such distance in C catchment was just around 200 m. The short distance added the nitrogen export risk via surface runoff. Road-type hydrological pathway in C catchment could transfer nitrogen into the receiving water via surface runoff directly, while nitrogen could be detained within the pathway by many sink structures such as small stones, vegetated buffer strip and dry ponds in T catchment.

Key words: North China; agricultural catchment; nitrogen; surface runoff; transfer; landscape pattern; hydrological pathway

通过降雨-地表径流途径输入过多的氮素是引起地表水水体富营养化和水生态系统恶化的重要原因^[1~4]. 当前我国许多饮用水水源均呈现不同程度的富营养化, 已经严重影响到区域饮水安全, 饮用水源地生态环境安全保障技术及污染物控制机制已经

收稿日期: 2007-10-08; 修订日期: 2007-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40601036); 国家科技支撑计划项目(2006BAD01B08); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403306)

作者简介: 陆海明(1978~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为水环境保护与生态水科学, E-mail: cnlhm@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ccqyin@263.net

成为环境科学研究的重要领域之一^[5-7]. 氮素和磷素等养分物质通过地表径流途径流失受气候、降雨、地形、植被和施肥管理措施等多种综合因素影响^[2-4, 6-8]. 目前, 国内已有的研究主要集中在南方温暖湿润、降雨量较高的区域, 包括巢湖流域、太湖流域和福建九龙江流域等^[3, 8-12], 在华北地区半干旱气候条件下的相关研究较少, 并且已有的研究又大多集中在利用降雨模拟装置探讨不同土地利用类型氮素输出过程机制方面. 本研究以地处华北半干旱地区的天津市于桥水库周边 2 个农业小流域为例, 通过对 2 个水文年的连续监测分析, 探讨自然降雨条件下农业流域地表径流氮素流失规律及其影响因素, 以期为控制水源地周边地表径流氮素流失, 防治水源地水体富营养化提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于桥水库位于天津市北部蓟县城东, 库区位于燕山山脉边缘地带, 是一座山谷形盆地水库. 水库正常蓄水位 21.16 m, 水库平均水深 4.6 m, 正常蓄水位时库容 3.85 亿 m^3 . 于桥水库是天津市重要饮用水水源地, 水库水体已处于富营养化状态^[13, 14]. 于桥水库周边主要是农业流域, 水库北岸在山坡和水库之间有地势平坦的冲积平原; 南岸地势较陡, 无冲积平原. 该地区属暖温带大陆性季风型半干旱气候.

本文选择于桥水库北岸的桃花寺小流域和南岸的曹各庄小流域为研究对象, 比较流域地表径流氮素流失特征. 桃花寺流域面积为 192.1 hm^2 , 流域地势为北高南低, 北部为山区坡度多在 25° 以上, 南部为冲积平原, 坡度多小于 5° . 曹各庄流域面积为 54.2 hm^2 , 地势南高北低, 坡度在 $20^\circ \sim 40^\circ$. 2 个小流域内人口数量分别约为 300 人, 土地利用类型包括坡地、农田、果园、村庄、道路和林地 (图 1). 桃花寺流域内有 1 座养鸡场 (规模达 800 只左右) 和 1 座养猪场 (规模为 30 头左右), 曹各庄流域内有 2 座养猪场, 规模约为 50 头. 2 个小流域内还有分散饲养的牛羊等, 畜禽粪便和生活垃圾通常堆放在路边或废弃地. 农田种植的作物主要是冬小麦和玉米, 部分农田在冬季休闲. 农田主要施用氮肥, 全年施用量约为 $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较少施用有机肥. 果园一般种植葡萄、山楂、杏树等经济果林, 以有机肥和化肥相结合, 施肥量较大, 特别是葡萄园, 年施肥量 (以 N 计) 达 $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 有关 2 个试验流域的其它详细情况见文

献[15].

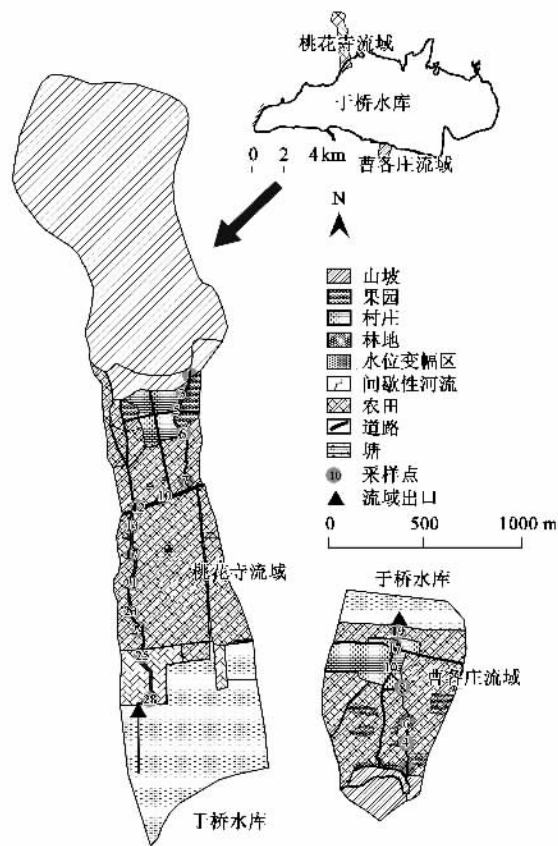


图 1 桃花寺和曹各庄流域位置和土地利用类型与采样点示意

Fig. 1 Distribution of land uses and sampling sites in Taohuasi catchment and Caogezhuang catchment

1.2 野外样点布设与采样方法

本研究降雨-地表径流监测于 2004 年和 2005 年进行, 包括流域内不同土地利用类型地表径流、间歇性河流中以及流域出口处地表径流流量和氮素浓度监测. 在桃花寺流域和曹各庄流域出口分别设置矩形和“V”型堰口, 每次降雨-径流时, 测定流量和采集水样, 全年流域氮素输出负荷计算采用下面提供的公式. 间歇性河流中地表径流监测是指在河流中布置不同的采样点, 降雨过程中视径流量变化和汇流历时长短每个点采集 3~5 个地表径流样品. 桃花寺流域间歇性河流中地表径流监测是在山地汇水区的出口作为第 1 个监测点, 流域的汇水出口作为最后一个监测点, 其它监测点分布于河道中, 共布设 28 个地表径流监测点. 在曹各庄流域中选择一条主要的间歇性河流 (道路), 从山坡到流域出口共设置 19 个采样点. 在降雨时, 不同土地利用类型地表径流监测是在降雨过程中每种土地利用类型上选取 3~10 个监测点采集样品, 每个采样点根据降雨时间的长

短采集 3~5 个地表径流样品.所有水样采集后,贮存在 4℃ 冰箱中,于 48 h 内送回中国科学院生态环境研究中心环境水质学实验室进行分析.

地表径流水样分析指标选取为总氮(TN)、溶解性总氮(TDN)、硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N).总氮和溶解性总氮(用孔径为 0.45 μm 的滤膜过滤后的水样,TDN)采用过硫酸钾消化(120 ℃, 200 kPa 消化 30 min),双波长比色法.经孔径为 0.45 μm 的滤膜过滤后的水样用双波长比色法测定硝态氮(NO₃⁻-N),用靛酚蓝比色法测定铵态氮(NH₄⁺-N).颗粒态氮(PN)=TN-TDN.所有测定均按照标准方法进行^[16, 17].

降雨资料监测点位置在离 2 个试验流域都不超过 10 km 的蓟县气象站内.

1.3 流域全年氮素流失负荷计算

流域降雨径流污染负荷是指由一场降雨或 1 a 中的多场降雨所引起地表径流排放的污染物总量,在本研究中的污染物是指地表径流流失的氮素.由一场降雨所引起地表径流排放的污染物总量称为次降雨径流污染负荷.按照污染负荷的概念,某种污染物的径流污染负荷可用降雨径流量与该污染物浓度的乘积来表示,则 1 a 中第 *i* 场降雨的污染负荷可表示为:

$$L_i = \int_0^{t_i} c_{t,i} Q_{t,i} dt \tag{1}$$

式中,*L_i* 是指 1a 中第 *i* 场降雨的污染负荷;*c_{t,i}* 是指 1a 中第 *i* 场降雨径流中某污染物在 *t* 时的瞬时浓度;*Q_{t,i}* 是指 1a 中第 *i* 场降雨径流在 *t* 时的径流量;*t_i* 是指第 *i* 场降雨形成径流的总历时.

由于在降雨径流监测过程中很难做到连续监测,为便于计算表示为:

$$L_i = \sum_{j=1}^n \frac{c_{j,i} + c_{j+1,i}}{2} \times \frac{Q_{j,i} + Q_{j+1,i}}{2} \times \Delta t \tag{2}$$

式中,*c_{j,i}* 和 *c_{j+1,i}* 是指 *i* 场降雨第 *j* 次和第 *j* + 1 次监测的污染物浓度;*Q_{j,i}* 和 *Q_{j+1,i}* 是指 *i* 场降雨第 *j* 次

和第 *j* + 1 监测的径流流量;Δ*t* 是指相邻 2 次采样、测流间隔时间;*n* 是指 *i* 场降雨径流过程中的采样和测流次数.

全年降雨径流氮素输出负荷为全年所有降雨次数中氮素输出负荷之和.

2 结果与分析

2.1 试验流域不同土地利用类型氮素流失潜力比较

表 1 比较了 2 个小流域主要土地利用类型的基本性质,2 个小流域地貌和植被覆盖为典型的华北半干旱地区地貌类型,全流域以旱地为主,无水田.桃花寺流域土地利用类型以山坡和农田为主,果园主要由人力物力投入很大的葡萄园组成,林地主要分布在水库岸边和山坡.曹各庄流域主要土地利用类型为农田和村庄,果园以杏树和山楂树等肥料投入较低的果树组成.在 5 种土地利用类型中,植被覆盖率以农田和林地为最高,其土壤饱和和导水率较高,地表径流相对容易入渗,村庄地表覆盖以房屋和道路为主,地表入渗率较低,相对容易产流.山坡植被覆盖以稀疏的松树和灌木丛为主,土壤以风化程度较浅的粗骨土为主,伴有石砾.桃花寺流域大多数山坡产生的地表径流贮存于山沟中或者通过向下入渗进入地下水,只有直接面对村庄和间歇性河流的山坡地表径流可以被传输进入流域下游.

土壤全氮含量以村庄为最高,其含量变幅范围也最大,果园土壤全氮含量其次,山坡最低.不同土地利用类型地表径流总氮浓度的变化趋势同土壤全氮含量相似,以村庄总氮浓度最高,山坡最低.由于山坡上常有当地居民散放的牛羊等家畜,家畜的踩踏和采食降低植被覆盖和增加表层土流失,因此经常放牧的地方土壤全氮含量和地表径流氮素浓度较高.综合考虑地表径流产流能力和氮素累积量这 2 个因素,可以认为村庄和果园是最主要的潜在污染源区,是地表径流氮素输出的“关键源区”.

表 1 2 个小流域不同土地利用类型基本性质比较¹⁾

Table 1 Comparison of some characteristics for various landscapes of the two study catchments

土地利用类型	土地覆盖	饱和导水率 /mm•h ⁻¹	土壤总氮含量/g•kg ⁻¹ 中值(最小值-最大值)	地表径流总氮浓度/mg•L ⁻¹ 中值(最小值-最大值)
山坡	松树、灌木	56.4	0.39 (0.35-1.72)	9.56 (4.58-14.81)
农田	小麦、玉米	79.8	0.59 (0.42-1.84)	16.02 (3.85-24.71)
果园	杏树、山楂树、葡萄树	67.2	0.65 (0.45-1.39)	16.55 (4.34-74.98)
村庄	房屋、道路	4.2	0.82 (0.39-3.90)	20.30 (3.93-91.75)
林地	杨树、灌木	nd	0.52 (0.41-0.58)	nd

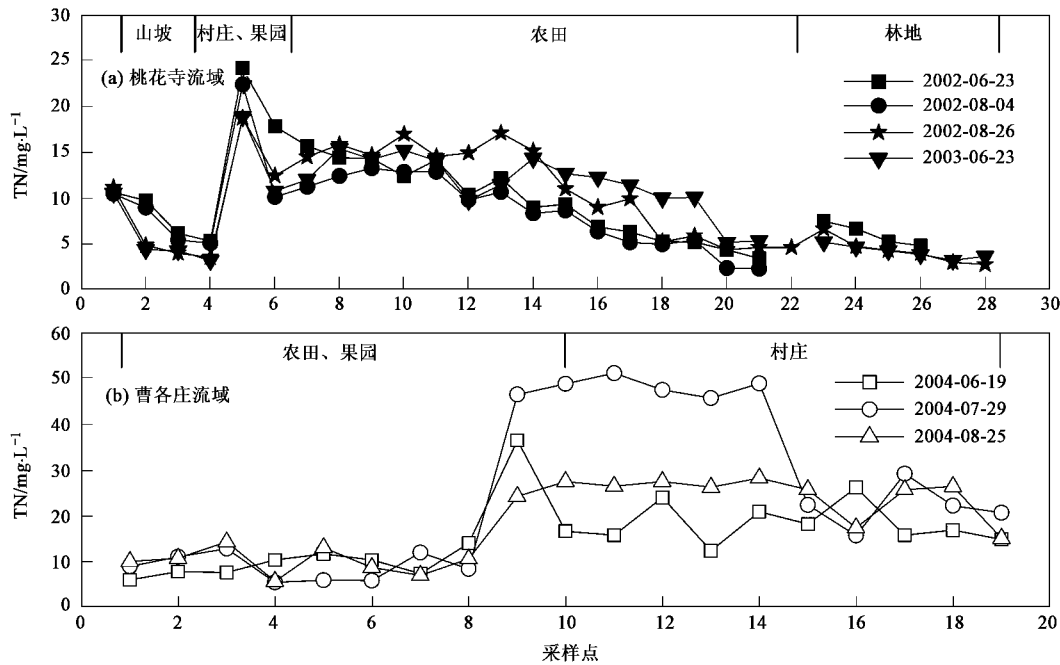
1) nd 表示未测定

2.2 试验流域迁移廊道中地表径流总氮浓度变化

图 2 表示 2 个流域间歇性河流中地表径流总氮浓度的空间变化过程.在桃花寺流域所监测的几场降雨-地表径流事件中,村庄和果园中的间歇性河流中地表径流浓度最高,超过 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,农田间歇性河流中地表径流总氮的浓度在迁移过程中越来越低,在降雨量相对较小,某些河段中采集不到地表径流,林地间歇性河流全氮浓度相对最低.在流

域出口处地表径流总氮浓度低于 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

曹各庄流域中所监测的 3 次降雨-径流事件中,流域的上游农田和果园间歇性河流中地表径流总氮浓度最低,在村庄中的间歇性河流中地表径流总氮浓度相对最高,流域出口处总氮浓度略低于村庄中总氮浓度,在 $15\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.在不同降雨-径流事件中村庄地表径流浓度变异较大,最高浓度接近 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最低浓度在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.



采样点号码从小到大表示从河流源头到流域出口

图 2 试验流域间歇性河流地表径流总氮浓度变化及其两侧土地利用类型比较

Fig.2 Total nitrogen concentrations in surface runoff divided by land use on the two sides of an ephemeral stream

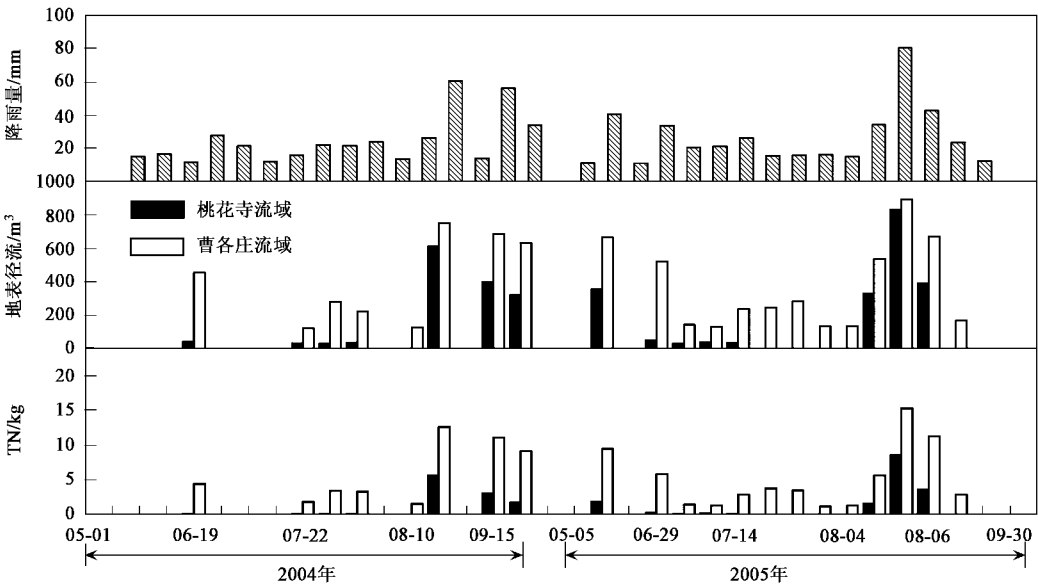
2.3 试验流域地表径流氮素输出特征

于桥水库周边流域气候类型属于华北半干旱气候条件,2004 年和 2005 年全年降雨量分别为 570.1 mm 和 559.8 mm ,略低于多年平均降雨量 601 mm .试验期间降雨主要集中在汛期 6~9 月,以 7 月和 8 月最多.试验流域全年地表径流输出和全氮输出负荷与降雨量分布相类似,图 3 表示的是 2004 年和 2005 年 $>10\text{ mm}$ 降雨事件中地表径流和全氮输出负荷输出量.从中可以看出,在相同的降雨事件中,2 个流域的地表径流输出和全氮输出负荷相差较大,特别是在降雨量较小的时候,曹各庄流域的输出量要大于桃花寺流域.

对试验期间不同降雨量事件中 2 个流域地表径流、总氮输出负荷和发生次数进行统计分析如表 2.降雨量在 $0\sim 10\text{ mm}$ 的事件中,2 个流域都没有地表

径流和全氮输出;降雨量在 $10\sim 20\text{ mm}$ 事件中,桃花寺流域仍没有地表径流和氮输出,曹各庄有地表径流和全氮输出,但占全年输出负荷的比例较低 ($<10\%$). 2 a 试验期间共发生 2 次降雨量 $>60\text{ mm}$ 的暴雨,其降雨量尽管只占总降雨量的 12% ,但是,桃花寺流域地表径流和总氮输出负荷分别占总量的 41% 和 52% ,曹各庄流域地表径流和总氮输出负荷分别仅占总量的 20% 和 14% .曹各庄流域在不同降雨量事件中地表径流和全氮输出负荷的比例较桃花寺流域均匀,桃花寺流域地表径流和全氮负荷输出比曹各庄流域更集中在少数几次降雨中.

桃花寺流域和曹各庄流域年均径流系数分别为 0.0016 和 0.0132 ,桃花寺流域和曹各庄流域全年单位面积总氮输出负荷分别为 $0.158\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $1.048\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.



日降雨量 < 10 mm 的降雨事件未列出

图 3 试验期间 2 个流域日降雨量、地表径流输出和总氮负荷输出比较

Fig.3 Daily rainfall, water and TN export from the two catchments

表 2 2 个试验流域地表径流、总氮输出负荷和发生次数随不同降雨类型分布统计¹⁾

Table 2 Summary of water volume, and TN load for different rainfall types

降雨类型/mm	降雨事件数	降雨量/mm	地表径流/m ³		总氮负荷/kg	
			桃花寺	曹各庄	桃花寺	曹各庄
0~10	99	302(27)	/	/	/	/
10~20	15	211(19)	/	804(10)	/	9.9(8)
20~30	10	236(21)	250(7)	1 898(24)	1.0(4)	23.2(28)
30~40	3	102(9)	702(20)	1 693(21)	3.6(13)	20.7(11)
40~50	2	83(7)	748(21)	1 340(17)	5.5(20)	20.8(28)
50~60	1	56(5)	402(11)	689(9)	3.1(11)	11.1(11)
>60	2	141(12)	1 447(41)	1 645(20)	14.2(52)	28.0(14)
总计	132	1 131(100)	3 550(100)	8 069(100)	27.3(100)	113.6(100)

1) 括号中数据表示所占比例; /表示没有监测到地表径流和总氮流失

2.4 试验流域土地利用类型、地表径流迁移廊道和微地貌的特征比较

从图 1 可以看出,桃花寺流域的土地利用格局为山坡-村庄-农田-岸边林地,曹各庄流域的土地利用格局为山坡-果园-农田-村庄.桃花寺流域主要潜在污染源村庄和果园同水库距离大约1 500 m,曹各庄流域村庄离水库距离仅约 200 m.曹各庄流域间歇性河流河道通常被村民作为生产和生活所用道路,其底部被压实,结构紧密,土壤入渗率较低,在降雨时上游的污染物可以快速地随着地表径流迁移至流域出口处.桃花寺流域间歇性河流为非道路型河流,大部分河段中植被生长良好,河道底质土壤结构疏松,河流中分布着小石坝,干塘等可以对污染物有着滞留作用的“汇”型景观结构.

受长期人为活动的影响,自然地貌受到显著的改变.农田经过土地平整后成为面积大小不等块状,具有相同高程的台地田,不同田块之间的高程并不完全是沿着山坡到水库呈逐渐降低的趋势,有些地方中间地块高程比周围的地块要低,形成类似于干塘的结构,在降雨时周边田块的地表径流首先汇集到低洼地块.台地农田常被分割成小块地,不同小块地用田埂相互间隔,田埂高度一般达到 5~15 cm,而且在田块周围一般是封闭的,形成小型水库存贮地表径流,因此降雨量在较小的时候,这类农田一般仅有较少的地表径流汇流到间歇性河流中.另外,在果园中村民为了利用雨水,常常在果树根周边做一圈田埂用来存水.在桃花寺流域,存在一些由于建筑取土,养鱼或者存水形成的干塘,据估计所有塘的存贮

容量达8 600 m³,相当于地表径流深 4.5 mm.

3 讨论

本试验流域气候类型属于华北半干旱气候条件,降雨量较低且相对集中,这就决定了流域全年地表径流氮素输出主要发生在相对较短的时期,这就不同于降雨量相对丰沛的南方湿润地区全年养分输出的持续时间通常较长^[12, 18].由于气候相对干燥,降雨前期的土壤含水率通常较低,加上试验流域长期受人为活动干扰,形成的复杂地形地貌提高了流域产生和输出地表径流的最小降雨量和降雨强度的最小限值,因此本研究所得到的流域全年地表径流系数远低于湿润的南方地区,这就造成地表径流途径流失的氮素相对南方农业流域较低^[12, 18].但从整个流域角度来看,从 2 个农业流域流失的氮素数量可能并不低,相当比例的氮素可能通过壤中流途径进入受纳水体,特别是果园和农田施入氮肥量较大的土地利用类型,产流系数较低,氮素特别是硝态氮通过壤中流途径进入水库的风险较高.整个流域地表径流和壤中流途径流失氮素的相对比例仍需进一步加强长期观测和探讨.因此,在华北半干旱区,对于离受纳水体较近的农业流域,氮素通过地表径流和壤中流途径流失均应该受到高度重视.

污染源和受纳水体之间的距离是影响污染物能否迁移到水体的重要因素之一,显然两者距离越近污染物迁移到受纳水体的风险就越大,迁移的距离越远污染物被滞留的机会就越高.2 个试验流域内养分输出的关键源区与受纳水体之间的距离有着明显的差异,在曹各庄流域村庄紧邻着于桥水库(仅 200 m),村庄内形成的高浓度含氮地表径流可以直接进入水库内;而在桃花寺流域村庄和葡萄园地表径流携带的氮素在进入水库之前需要经过1 500 m 的距离,降低了其进入受纳水体的风险.由于水源和交通等原因,在我国特别是南方有“逐水而居”的习惯,人们通常喜欢居住在河流两岸和湖库畔.随着人口密度和人为活动强度的增加,河流湖泊等水体附近的居民生产生活产生的污染物进入受纳水体的数量也大大增加,这就往往造成大量居民附近的河流湖泊水质通常较差.因此,为了减轻河流湖泊的污染,减少水边附近污染的排放,可以通过适当增加受纳水体与污染源的距离或者搬迁主要污染源的方法,还河流湖泊以空间.结合当前我国水源地管理的规定,需要严格执行在不同等级的水源地保护区内相应的管理规定,控制污染物向水源地水体排放.

累积在地表的养分在降雨的作用下随着地表径流离开土-水界面后经过迁移廊道传输到达受纳水体.迁移廊道的性质在很大程度上决定了养分能否从上游快速地向下游传输.桃花寺流域和曹各庄流域迁移廊道性质具有明显的差异,曹各庄流域迁移廊道由洪水冲积而成的间歇性河流组成,在非降雨时间歇性河流主要功能是作为村民生产生活用的道路.受到农业机械车轮的碾压和人为的踩实,间歇性河流河床底部土壤结构紧实,降雨入渗率较低,在降雨时上游的地表径流和冲积物可以很快地通过间歇性河流传输到下游至流域的出口.在桃花寺流域养分传输廊道同样是由洪水冲积而成的间歇性河流,与曹各庄流域不同的是桃花寺流域传输廊道不承担村民生产生活道路的功能.在桃花寺流域间歇性河流中存在多种对污染物有着滞留吸纳作用的“汇”型结构,如小石坝、植被过滤带和干塘等.这些“汇”型结构可以通过增加入渗、减少地表径流的流量,或者通过降低流速、土壤基质吸附与增强反硝化作用等途径有效地减少养分向下游迁移^[19].因此,可以通过适当改变流域迁移廊道的性质,增加迁移廊道中的“汇”型结构减少上游污染物迁移到受纳水体的风险.

4 结论

(1) 在华北半干旱气候条件下,饮用水水源地于桥水库周边的农业小流域桃花寺流域和曹各庄流域全年通过地表径流形式输出的氮素负荷集中在 6 ~ 9 月,全年氮素平均输出负荷分别为 0.158 kg·(hm²·a)⁻¹和 1.048 kg·(hm²·a)⁻¹.2 个流域地表径流氮素输出的降雨量最小阈值分别约为 20 mm 和 10 mm.在不同的降雨量的降雨事件中,桃花寺流域全年养分负荷输出主要集中在 1 ~ 2 次降雨事件中,曹各庄流域全年养分负荷输出分配比例较均匀.

(2) 受长期人为活动干扰和农业生产活动的需要,试验流域形成了复杂的微地形地貌结构,降低了流域产生地表径流的能力,同时也减少了流域地表径流氮素输出.地表氮素主要累积区域与受纳水体的距离越近,地表径流氮素流失的风险越高.桃花寺流域地表径流迁移廊道中存在的“汇”型结构可以将部分氮素在传输过程中有效地滞留消纳,而在曹各庄道路型传输廊道氮素地表径流可以很快地迁移到流域的下游至流域出口处.

参考文献:

[1] Liu C M, Xia J. Water problems and hydrological research in the

Yellow River and the Huai and Hai River basins of China [J]. Hydrol Process, 2004, **18**(12): 2197-2210.

[2] Fierer N G, Gabet E J. Carbon and nitrogen losses by surface runoff following changes in vegetation [J]. J Environ Qual, 2002, **31**(4): 1207-1213.

[3] 朱继业, 高超, 朱建国, 等. 不同农地利用方式下地表径流中氮的输出特征 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2006, **42**(6): 621-627.

[4] 许朋柱, 秦伯强, Horst B, 等. 太湖上游流域农业土地的氮剩余及其对湖泊富营养化的影响 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 395-400.

[5] 杨爱玲, 朱颜明. 城市地表饮用水源保护研究进展 [J]. 地理科学, 2000, **20**(1): 72-77.

[6] Wang X, Li T, Xu Q, *et al.* Study of the distribution of non-point source pollution in the watershed of the Miyun Reservoir, Beijing, China [J]. Water Sci Technol, 2001, **44**(7): 35-40.

[7] Chen L D, Fu B J, Zhang S R, *et al.* A comparative study on nitrogen-concentration dynamics in surface water in a heterogeneous landscape [J]. Environ Geol, 2002, **42**(4): 424-432.

[8] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征 [J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1671-1675.

[9] 洪华生, 曹文志, 张玉珍, 等. 九龙江典型流域氮磷流失的模拟研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, **43**(B08): 243-248.

[10] Yan W J, Zhang S, Chen X B, *et al.* Nitrogen export by runoff from agricultural plots in two basins in China [J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2005, **71**(2): 121-129.

[11] 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程 [J]. 地理学报, 2002, **57**(4): 389-396.

[12] Gao C, Zhu J G, Zhu J Y, *et al.* Nitrogen export from an agriculture watershed in the Taihu Lake area, China [J]. Environ Geochem Health, 2004, **26**(2): 199-207.

[13] 李玉英, 侯任合. 于桥水库富营养化趋势及成因 [J]. 水利水电技术, 2001, **32**(8): 61-63.

[14] 杜玉凤. 于桥水库水体富营养化及防治对策 [J]. 海河水利, 2005, (1): 36-38.

[15] Lu H M, Yin C Q, Wang W D, *et al.* A comparative study of nutrient transfer via surface runoff from two small agricultural catchments in north China [J]. Environ Geol, 2007, **52**(8): 1549-1558.

[16] APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. (18th edition). Washington DC, American Water Works Association, 1985.373-412.

[17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.160-178.

[18] Cao W Z, Hong H S, Zhang Y Z, *et al.* Anthropogenic nitrogen sources and exports in a village-scale catchment in Southeast China [J]. Environ Geochem Health, 2006, **28**(1-2): 45-51.

[19] Wang X H, Yin C Q, Shan B Q. The role of diversified landscape buffer structures for water quality improvement in an agricultural watershed, North China [J]. Agr Ecosyst Environ, 2005, **107**(4): 381-396.