

阿什河流域非点源氮污染的 $\delta^{15}\text{N}$ 源解析研究

胡 钰^{1,3}, 王业耀^{2*}, 滕彦国¹, 香 宝³, 马广文², 方广玲³

(1.北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2.中国环境监测总站, 北京 100012; 3.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要: 农业活动往往沿着河流而发展, 其产生的氮污染极大地影响了流域水质。选择以种植业为主的阿什河作为典型流域, 利用水质、土壤监测技术和 ^{15}N 稳定同位素示踪技术, 对流域水体氮污染、种植业土壤氮特征以及氮污染来源进行解析。结果表明阿什河水质总氮浓度较高, 氮污染较严重; 位于上游的采样点水质较好, 中游开始到下游水质逐渐恶化。种植业对于流域水体氮污染的影响根据水期以及种植周期的不同而有着不同的影响方式: 平水期以种植业非点源氮污染为主要污染源的区域主要分布在中下游处, 其 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 0.46%~0.77%, 表现为人工合成化肥和农田退水造成的土壤有机氮污染; 丰水期以种植业非点源氮污染为主要污染源的区域较多, 其 $\delta^{15}\text{N}$ 值集中在 0.19%~0.40%; 上游地区以人工合成化肥为主要污染源, 中下游以雨水及灌溉冲刷种植区土壤而形成的土壤有机氮来源为主。枯水期也有部分地区受到以人工合成化肥为主要污染源的氮污染, 其 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 0.11%~0.38%, 主要是由于雨季人工合成化肥中的硝态氮下渗到土壤下层, 当枯水期时地下径流补给河流, 其中滞留的硝态氮对河水造成污染。

关键词: 非点源污染; 氮同位素; 氮污染特征

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2015)12-2327-09 doi:10.11654/jaes.2015.12.011

Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen Pollution in Ashi River Basin Using $\delta^{15}\text{N}$ Technique

HU Yu^{1,2}, WANG Ye-yao^{2*}, TENG Yan-guo¹, XIANG Bao³, MA Guang-wen², FANG Guang-ling³

(1.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 3.Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Crop farming activities along river have significantly affected the quality of river water. In this paper, nitrogen pollution in river water basin, nitrogen characteristics in crop farming soil and nitrogen pollution origins were investigated in the Ashi River basin, using water quality and soil monitoring techniques as well as ^{15}N stable isotope. Results showed that there were high nitrogen concentrations in Ashi River water. The water quality was relatively good in the upstream section of the river, but gradually became worse in the midstream and downstream sections. This pattern is closely related to the land use types and human activities. The impacts of crop farming on water nitrogen pollution were dependent on river water seasonal periods and farming cycles. During the normal water period, non-point nitrogen pollution by crop farming occurred mainly in the midstream and downstream sections, with $\delta^{15}\text{N}$ value ranging from 0.46% to 0.77%. The pollution sources were primarily artificial chemical fertilizers and farmland water recession. During the high water period, the pollution from non-point nitrogen extended to the upstream area, with $\delta^{15}\text{N}$ range of 0.19%~0.4%. The main pollution source was artificial chemical fertilizers in the upstream area, while it was soil organic nitrogen via soil erosion caused by rainfall and irrigation in the midstream and downstream. During the low water period, however, artificial chemical fertilizers were still the main contributor of non-point nitrogen pollution, with $\delta^{15}\text{N}$ values of 0.11% to 0.39%. This was resulted from the feedback of the nitrite-nitrogen from artificial chemical fertilizers that were applied and infiltrated in the ground during the monsoon.

Keywords: non-point source pollution; $\delta^{15}\text{N}$ - NO_3^- isotope tracers; nitrogen pollution

收稿日期: 2015-06-20

基金项目: 国家水专项(冻融条件下农田非点源污染过程和水质目标管理技术研究, 2014ZX07201-009-01)

作者简介: 胡 钰(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事农业非点源污染防治研究。E-mail: hellen_huyu@163.com

* 通信作者: 王业耀 E-mail: yeyao wang@163.com

农业非点源污染正在成为水体污染的主要原因,特别是随着对点源污染控制的逐步加强,在水体污染中农业非点源所占的比重不断增加^[1-2]。在种植业集约化地区,农村地表水和地下水硝态氮的超标率正在上升^[3-4],以山东省为例,全省地下水硝酸盐含量均值为 $10.43\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标率达到 14.15% ^[5],这与化学氮肥的大量投入紧密相关。我国种植业面积广,种植业造成的非点源污染占了农业非点源污染的很大一部分,对于不同来源的农业非点源污染有着不同的治理方式,为了进行有效的农业非点源污染控制,选取适宜的污染控制方式,识别主要农业非点源污染源是技术的关键。

同位素示踪监测技术对流域非点源污染来源可进行较直接的研究^[6-7]。以氮同位素示踪监测技术为例,自然界中氮原子主要有 ^{14}N 和 ^{15}N 两种氮稳定同位素,不同物质的氮同位素组成不同。自然条件下水环境中 NO_3^- 背景值通常不高,人为活动常常导致水环境中 NO_3^- 浓度激增^[8]。已有研究表明,不同来源的硝态氮具有不同的同位素组成,人工合成化肥 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值大多在 $0\%\pm 0.4\%$ ^[9],土壤有机氮的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值在 $0.4\%\sim 0.9\%$ 范围内变化^[10],人畜排泄物的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值范围为 $0.8\%\sim 2\%$ ^[10-11],大气沉降的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值在 $0.2\%\sim 0.8\%$ ^[12],城市生活污水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值高于 1% ^[8],工业来源废水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值小于 1% ^[12]。因此,通过河水及地下水氮同位素研究可以较好地示踪水中氮素的来源^[13-14],以弥补传统方法的不足,从而提供一种直接识别污染源的手段。

松花江流域是我国重要的粮食生产基地之一,集约化、机械化、规模化的农业活动增大了农用化学品的投入。在本研究中,选取松花江一级支流阿什河流域作为研究对象,该流域是典型的以农业为主的区域,农业又以种植业为主,种植业氮径流流失量是最大的潜在非点源污染源。本文采用 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素示踪技术,结合传统监测技术,主要研究以下几个问题:(1)分析识别阿什河流域平-丰-枯不同水期氮污染物特征,分析氮在水体中的迁移、转化及来源分配进行解析;(2)研究阿什河流域种植业造成的非点源氮污染分布;(3)种植业土壤氮和进入水体氮的相关性。这些问题的研究将为减少阿什河流域的氮污染量提出针对性的建议,为水环境管理部门分类、分段、分区治理提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

阿什河位于黑龙江省南部,属于松花江干流南岸

一级支流,全长 257 km ,阿什河流域处于东经 $126^\circ 40'\sim 127^\circ 42'$ 、北纬 $45^\circ 05'\sim 45^\circ 49'$ 之间,流域面积 3545 km^2 。阿什河两岸农业生产大量施用化肥、农药所造成的非点源污染,导致阿什河阿城以下河段水质污染严重,水质长期为劣V类。阿什河中下游干流丰水期水面宽 $238\sim 360\text{ m}$,水深 $4\sim 4.7\text{ m}$;枯水期水面宽 $10\sim 23.5\text{ m}$,水深 $0.2\sim 0.25\text{ m}$ 。阿什河水量季节性特征明显,枯水期与丰水期、平水期河道水量差异较大,丰水期为每年的7月、8月;平水期为每年的4月、5月、6月、9月和10月;枯水期为每年的1月、2月、3月、11月和12月,每年11月中旬至次年4月上旬为结冰期。阿什河流域上游为林区,植被覆盖良好,中下游为城市区和农业区。种植业是阿什河流域最大的土地利用类型,占流域面积的 46.25% 。主要的农作物为水稻、玉米和大豆,每年5月中下旬和8月上中旬为稻田退水期。

分别于2011年阿什河流域平水期(5月)、丰水期(8月)、枯水期(11月)进行样品的采集。水体采样点共22个,平均分布在阿什河流域的源头-上游-中游-下游-流域出口。为了反映流域污染特征,本研究根据流域土地利用类型的不同,以及各小支流的源汇状况,基本保证了各二级支流在入河前后均设置监测点,全流域不同土地利用类型上下游设置监测点,所有监测河流能控制阿什河80%以上的进出水量。采样点A01~A12属于上游、A13~A19属于中游、A20~A22属于下游。平水期A15点缺失,其余21个采样点均采到水样;丰水期22个采样点均采集到水样;枯水期采样点A15、A18处干涸,没有采集到水样,其余20个采样点均采集到水样。通过土地利用分析,点位A08、A10、A12、A13、A15、A16、A18、A20、A21所代表的区域主要土地利用类型为耕地,点位A01~A07所代表的区域主要土地利用类型为林地,点位A09、A11、A14、A17、A19、A22所代表的区域主要土地利用类型为建设用地。每个采样点的汇水区域代表范围见图1。

对阿什河流域种植区进行土壤监测,监测点位分布在流域水位采样点附近 50 m 范围内的典型种植区。共布设12个采样点,选取在种植区平均坡度,采集 $0\sim 15\text{ cm}$ 的表层土壤。采样点T01、T03、T12种植类型为水稻,采样点T02、T04、T07、T09种植类型为玉米,采样点T05、T06、T08、T10、T11种植类型为大豆。阿什河流域土地利用类型及土壤采样点位置分布见图2。

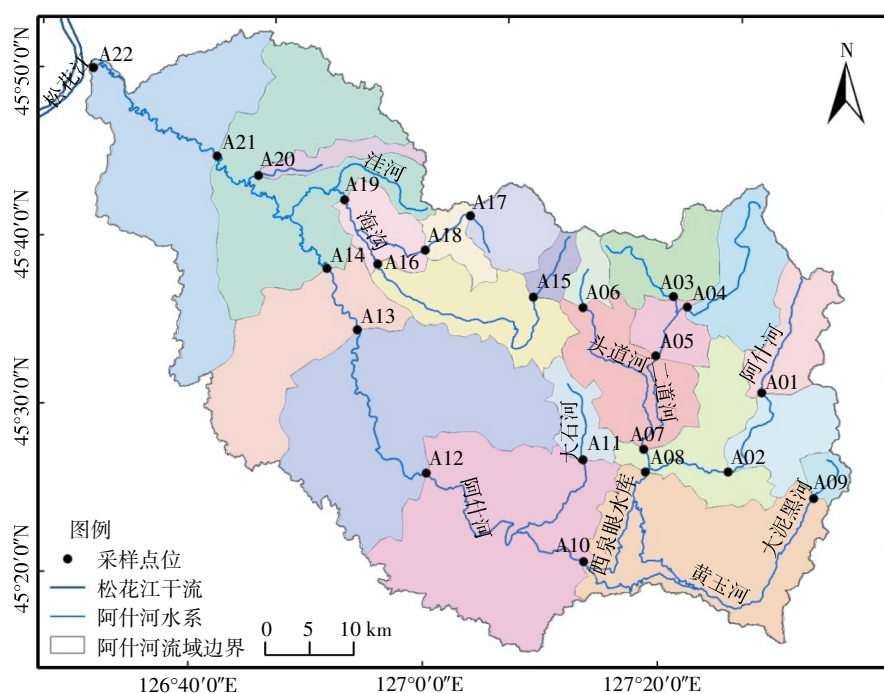


图 1 采样点的汇水区域

Figure 1 Distribution of water sampling points in catchment area

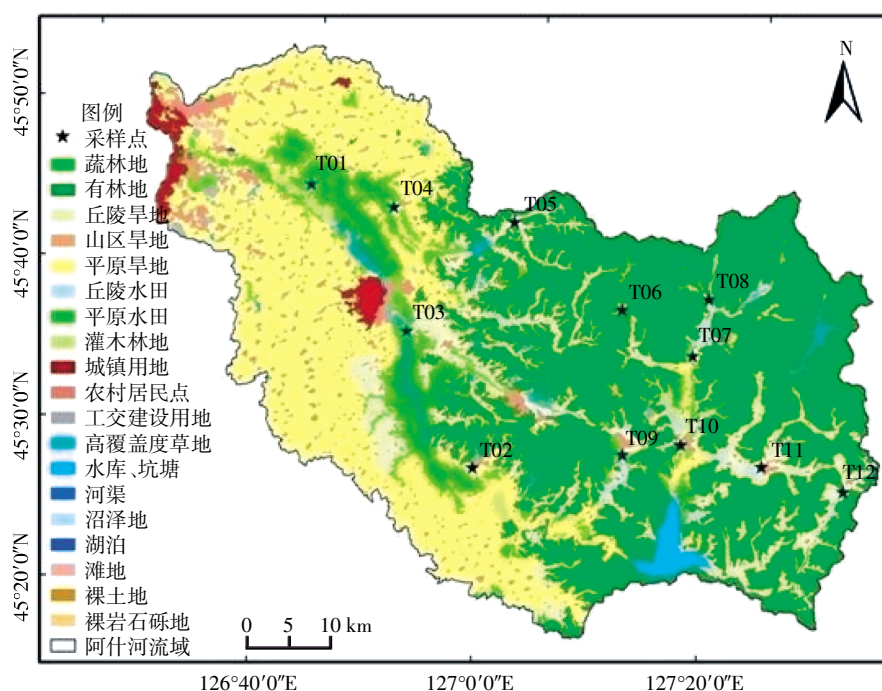


图 2 流域种植区土壤采样点位分布

Figure 2 Soil sampling points in Ashi River basin

1.2 实验方法

每个样点的水样取 3 个平行样品,采集后储藏在干净的聚乙烯瓶中,保存于 4 ℃ 冰箱中,并在 24 h 内完成 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的测定以及 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素前

处理。土壤样品采集后放入密封塑料袋中,带回实验室将新鲜土壤过筛进行 NO_3^--N 的测定。 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 采用国家标准方法测定。

$\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 同位素采用阴离子交换硝酸银法,具体

步骤如下:将水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,通过设计的树脂柱和组合的成套离子交换仪器进行阴离子交换,用盐酸($3\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)洗脱吸附在树脂柱上的 NO_3^- ,向洗脱液中逐次加入 Ag_2O ,反应进行至 pH 达到 5.5~6.0 之间;过滤掉 AgCl 沉淀,将含有 AgNO_3 的滤液进行冷冻干燥,将得到的 AgNO_3 样品晶体送往中国科学院地球环境研究所同位素实验室进行测定。

测试采用 Delta Plus 稳定同位素气体质谱仪(美国 Thermo 公司)方法的标准偏差为 $\pm 0.02\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 值用如下公式计算^[15]:

$$\delta\text{样品} = [(\text{R 样品} - \text{R 标准}) / \text{R 标准}] \times 100\%$$

数据用 Origin 8、SPSS 16.0 软件进行统计分析,

不同采样点水样指标变化显著性检验采用单因子方差分析(ANOVA)处理,监测点土壤氮含量和小流域水体氮含量之间的相关性用 Pearson 相关系数评价。

2 结果与分析

2.1 流域氮污染特征

阿什河流域总氮污染情况如图 3(a)所示,位于源头的采样点水质较好,逐渐到下游水质恶化。按照水期分布分析,总体呈现枯水期>丰水期>平水期的趋势特征,流域枯水期总氮的平均浓度为 $3.67\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,丰水期平均浓度为 $3.01\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平水期平均浓度为 $2.36\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总氮浓度最大值出现在枯水期 A14 采样点,

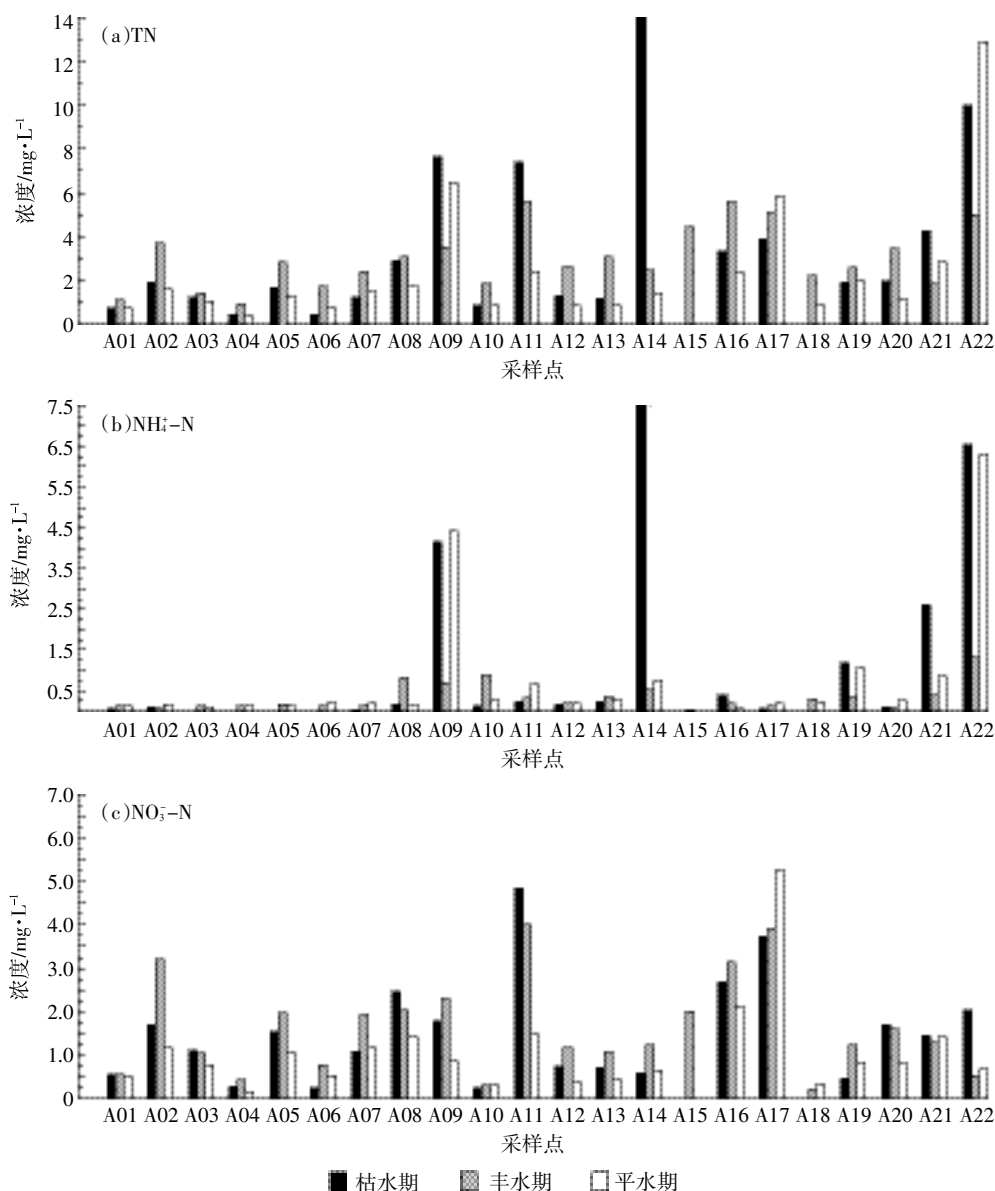


图3 阿什河流域水体氮浓度变化

Figure 3 Variation of nitrogen concentrations in river water

浓度值高达 $19.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 主要是由于流域附近工业排污影响。阿什河水质氨氮指标如图 3(b)所示,位于源头的采样点水质较好,到下游水质逐渐恶化。按照水期分布分析,流域氨氮的浓度变化为枯水期>平水期>丰水期。流域枯水期氨氮的平均浓度为 $2.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平水期平均浓度为 $0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,丰水期平均浓度为 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阿什河流域硝态氮含量分布如图 3(c)所示,总体呈现枯水期>丰水期>平水期的趋势特征,流域枯水期硝氮的平均浓度为 $1.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,丰水期平均浓度为 $1.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平水期平均浓度为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。方差分析表明,不同采样点水样指标以及同一采样点不同水期之间差异均显著($P<0.05$)。

总体来讲,阿什河水质总氮年平均浓度处于劣 V 类水平^[6],而氨氮除受工业点源影响的河段外,大部分区域保持在 III 类水平。通过对阿什河从源头到下游常规指标值分析可以看出,位于上游的采样点水质较好,中游开始到下游水质逐渐恶化。采样点 A01、A04、A06、A07、A10、A17、A19 在枯水期的总氮浓度均小于丰、平水期,说明这些点位主要污染源为种植业非点

源污染。A11 采样点的总氮浓度随着丰-平-枯水期水量的减少而升高,分析主要污染源可能为生活污水或畜禽养殖。枯水期 A14 总氮和氨氮浓度均较高,受点源影响较大。下游采样点 A22 经过哈尔滨市,上游有工业污水经污水处理厂出水,因此总氮和氨氮浓度均增加。

2.2 种植业土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量

阿什河流域种植区土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量浓度变化见图 4。平水期监测的时期正处于种植业的播种期,因播种期会大量地使用化肥^[7],从而造成土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度相对较高,采样点平均值为 $18.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。丰水期处于种植业的生长期,枯水期处于收割期后,这两个时期的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度含量相对低,平均值分别为 9.89 、 $13.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 流域 $\delta^{15}\text{N}$ 来源分析

流域 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ 源解析值见图 5 所示。平水期阿什河流域的采样点 A04、A12、A13、A14、A21 和 A22 的 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ 值为 $0.33\%\sim 0.40\%$,氮污染主要受化肥施用影响。中下游采样点 A05、A07、A08、A09、A10、

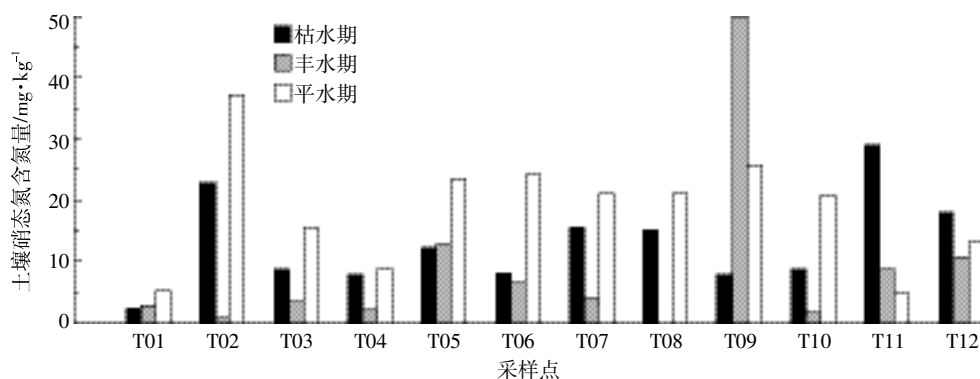


图 4 阿什河流域种植区土壤硝态氮含量

Figure 4 Variation of nitrogen concentrations in soils

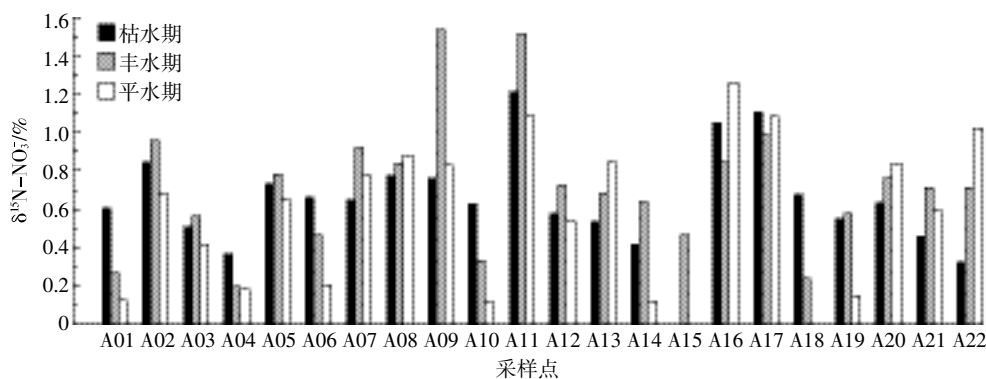


图 5 阿什河流域 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ 来源分析

Figure 5 Source analysis of $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ in Ashi River water

A18、A19 和 A20 的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值为 0.46%~0.77%，主要受稻田插秧后退水和农家肥的影响。源头区采样点 A01、A03、A06 的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值为 0.51%~0.66%，主要受自然原因土壤侵蚀造成的土壤有机氮污染影响。采样点 A02、A11、A16 和 A17 的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值为 0.85%~1.19%，说明其主要氮污染来源为分散式畜禽养殖和生活污水。丰水期阿什河氮污染主要受种植区化肥施用影响的采样点有 A01、A04、A06、A10、A15、A18， $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值为 0.19%~0.4%。枯水期阿什河氮污染主要受种植区化肥影响的采样点有 A01、A03、A04、A06、A10、A14、A19， $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值为 0.11%~0.39%。

3 讨论

3.1 阿什河流域水体与土壤氮含量相关性分析

将土壤采样点的 NO_3^--N 浓度与其所在汇水区的水样 NO_3^--N 浓度做 Pearson 相关性分析及其显著性检验，结果见表 1。结果显示在平水期土壤中 NO_3^--N 浓度和水质呈显著正相关 ($\text{Sig.}<0.01$)，在丰水期土壤与水体中 NO_3^--N 浓度也呈现显著正相关 ($\text{Sig.}<0.05$)，在枯水期其相关性不明显。

平水期正值种植业的播种期，这个期间化肥使用量大，土壤耕作对土壤造成的扰动大，造成部分土壤中的氮随着降雨以及灌溉等方式扩散到水体中，造成土壤水体 NO_3^--N 含量增加。这与 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 监测平水期显示的结果相符。 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 监测结果显示流域平水期 63.6% 的监测点主要氮污染来源为土壤有机氮。

丰水期处于作物生长期，其间会根据生长需要进行化肥的补充施加^[17]，同时还会有大量的稻田退水排入流域中，造成了土壤与水体 NO_3^--N 含量呈正相关。这与 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 监测平水期显示的结果相符。 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 监测结果显示流域丰水期 27.3% 的监测点主要氮污染来源为化肥。

枯水期处于作物收割后期，这个时期土壤中氮含量相对较低^[18]，并且农田土壤没有农耕行为的扰动，

所以土壤与水体的相关性不明显。这与 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 监测平水期显示的结果相符，枯水期流域氮污染来源呈分散性，以土壤有机氮为主要氮来源的点位仅占 22.7%。

3.2 种植业造成的氮污染特征及源分析

根据对 22 个汇水区 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 监测结果，流域丰—平—枯水期主要氮污染来源分布见图 6。通过对各个水样采样点所代表的小流域土地利用类型分析，将采样点位分为林地、耕地、建设用地三类，点位 A8、A10、A12、A13、A15、A16、A18、A20、A21 所代表的区域主要土地利用类型为耕地，点位 A1-A7 所代表的区域主要土地利用类型为林地，点位 A9、A11、A14、A17、A19、A22 所代表的区域主要土地利用类型为建设用地。

采样点不同水期的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 特征值箱线图见图 7(a)，不同土地利用类型的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 特征值箱线图见图 7(b)。从图 7(b)可以看出林地的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比耕地和建设用地低，建设用地的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布范围比耕地和林地的要广， $\delta^{15}\text{N}$ 值范围广说明氮污染的来源多，以建设用地为主的地区的氮污染来源主要为工业废水和生活污水，多半可视作稳定的氮污染来源。林地的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 0.13%~0.96%，平均值 0.54%，比耕地的值域要大。这是由于阿什河流域林场中存在一些居民住户以及小型畜禽养殖等，而林地的氮输出系数较小，以林地为主要土地利用类型的水域受其他污染源影响较大。耕地 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布相对集中，范围在 0.46%~0.88%，平均值 0.7%。这说明主要的氮来源为土壤有机氮，分析原因是施用的化肥进入土壤转化成土壤有机氮，伴随着降雨或者农业灌溉进入流域中^[19]。

通过这两图比较可以看出，平水期的 $\delta^{15}\text{N}$ 分布总体比耕地 $\delta^{15}\text{N}$ 分布要低，分析原因是由于平水期处于种植业的播种期，大量的化肥开始投入到农田系统中，部分化肥则随着排水直接进入了河流中。

耕地的 $\delta^{15}\text{N}$ 分布与丰水期流域 $\delta^{15}\text{N}$ 分布较为类

表 1 流域土壤与水体中 NO_3^--N 含量相关性分析 ($N=12$)

Table 1 Correlation coefficients of NO_3^--N concentration between soil and water ($N=12$)

土壤 NO_3^--N 含量 NO_3^--N concentration in soil	水体 NO_3^--N 含量 NO_3^--N concentration in water		
	平水期 Normal water period	丰水期 High water period	枯水期 Low water period
平水期 Normal water period	0.926**	—	—
丰水期 High water period	—	0.699*	—
枯水期 Low water period	—	—	-0.070

注：**表示在 0.01 水平显著相关，*表示在 0.05 水平显著相关

Note: ** and * indicate that correlation is significant at 0.01 and 0.05 level (2-tailed), respectively.

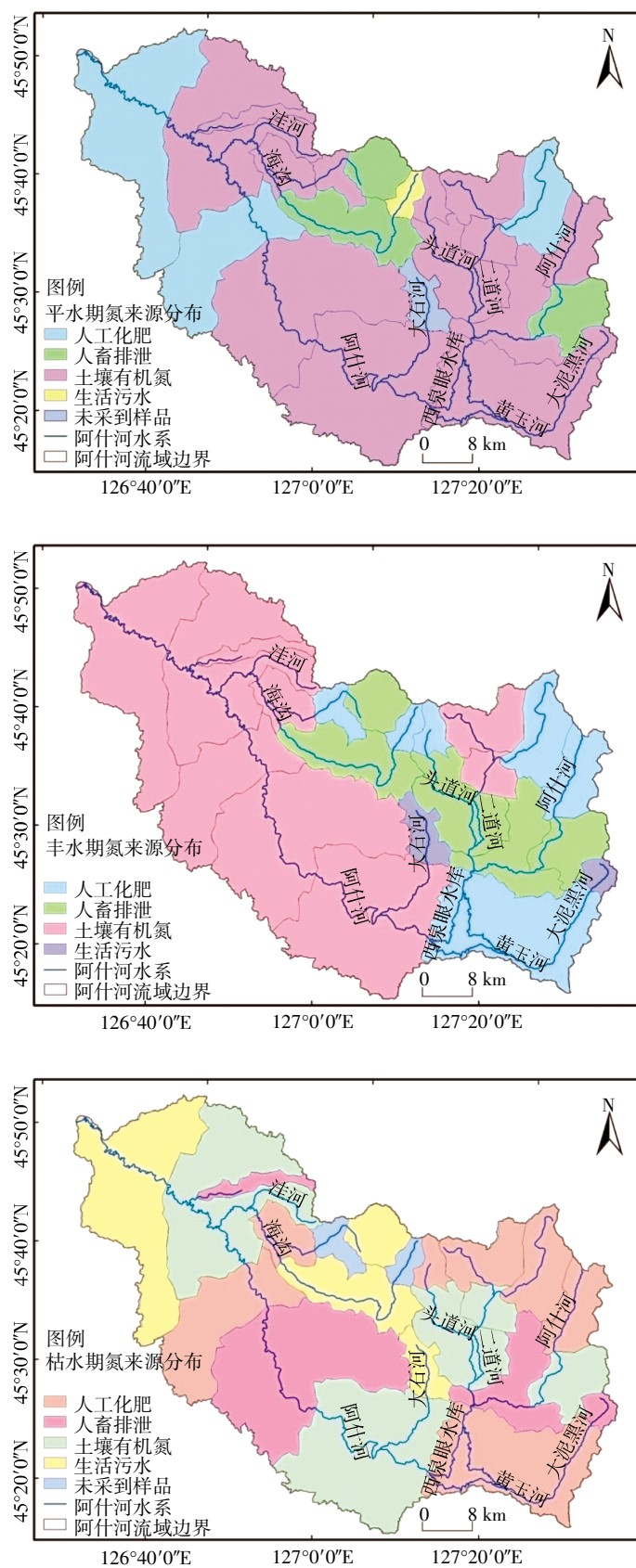
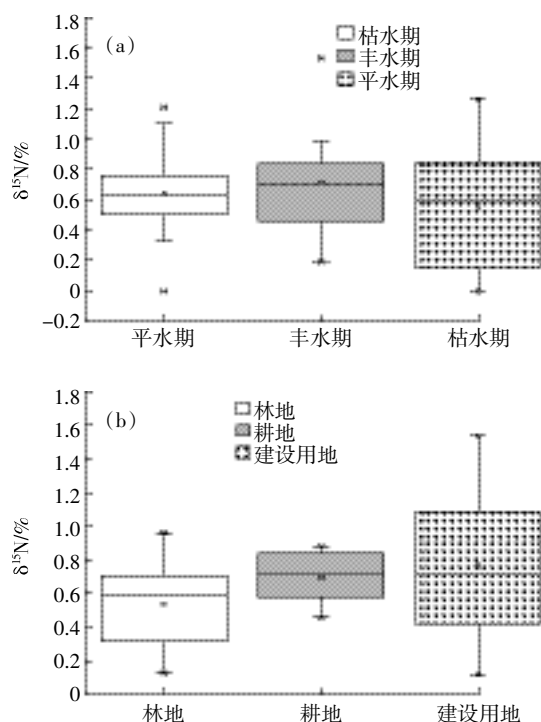


图 6 阿什河不同水期主要非点源氮污染来源分布

Figure 6 Source distribution of major non-point nitrogen pollution in Ashi River basin during different seasonal periods

图7 阿什河流域 $\delta^{15}\text{N}$ 分布箱线图Figure 7 Box plots of $\delta^{15}\text{N}$ value distribution in Ashi River Basin

似,说明丰水期时种植业是流域氮污染的主要来源,并且污染方式主要为土壤有机氮,由于耕作对于土壤造成的扰动较大,伴随着丰水期的降雨,种植区土壤中有机氮大量流失,成为丰水期流域主要的氮污染源。

建设用地的 $\delta^{15}\text{N}$ 分布与枯水期流域 $\delta^{15}\text{N}$ 分布较为类似,但总体分布要低一些,由于农业活动基本停止进行,再加上降雨的减少,种植业污染不再是流域主要污染源,建设用地稳定的氮污染输出凸显,成为枯水期的主要污染源。但是枯水期中有6个点位的 $\delta^{15}\text{N}$ 值处于0.11‰~0.21‰之间,属于人工化肥来源,可能是由于雨季人工化肥中的氮转化为硝态氮而下渗到土壤下层,当枯水期时,土壤下层径流补给河流,其中滞留的硝态氮对河水造成污染^[20]。

4 结论

通过对阿什河流域种植业氮污染特征的分析,论证了以种植业为主要生产类型的流域,其氮污染往往是很严重的,主要的氮污染来源是种植业造成的,但是在不同的时期污染的影响方式不同。

平水期种植区土壤氮含量和入水体中的氮相关性高度显著,以种植业非点源氮污染为主要污染源的区域主要分布在中下游处,主要表现为人工合成化肥

和农田退水造成的土壤有机氮污染,基于此阿什河流域在平水期主要的氮污染防治目标应放在高效施肥、农田排水节水利用上,防止化肥的过量施用及流失。

丰水期种植区土壤氮含量和入水体中的氮相关性显著,以种植业非点源氮污染为主要污染源的区域较多,来源以土壤有机氮为主。从播种期到生长期土壤内氮素含量有了一定的积累,另外丰水期时雨水丰沛,以及坡耕地频繁耕作均使土壤侵蚀量增大,在此期间流域氮污染防治重点为种植区土壤流失防治,加强灌溉排水高效利用以及农田堤堰的建设。

枯水期种植区土壤氮含量和入水体中的氮相关性不明显,主要氮污染来源为非农业,但也有部分地区由于雨季化肥中的硝态氮下渗滞留,当枯水期时,地下径流补给河流,其中滞留的硝态氮对河水造成污染。因此,农田灌溉及地下水下渗等问题也应纳入流域种植业非点源氮污染防治的范畴内。

参考文献:

- [1] 朱梅, 吴敬学, 张希三. 海河流域种植业非点源污染负荷量估算[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1907-1915.
ZHU Mei, WU Jing-xue, ZHANG Xi-san. Estimation on non-point source pollution loads of crop farming in Haihe Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1907-1915.
- [2] 马广文, 王业耀, 香宝, 等. 松花江流域非点源氮磷负荷及其差异特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 163-169.
MA Guang-wen, WANG Ye-yao, XIANG Bao, et al. Diversity characteristic and pollution load of non-point source total nitrogen and total phosphorus in Songhua River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(S2): 163-169.
- [3] Gafur Jensen A, Borggaard J R, et al. Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation in the Chittagong Tracts of Bangladesh[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 274(1-4): 30-46.
- [4] 方晶晶. 河北平原邯郸地区地下水硝酸盐污染来源及迁移转化过程的多元素同位素及微生物(*E. coli*)示踪[D]. 中国地质大学, 2014: 86-91.
FANG Jing-jing. Use of multi-isotope and microbial technology(*E. coli*) for evaluating sources and transformation of nitrate in the groundwater in Handan Area in the North China Plain[D]. China University of Geosciences, 2014: 86-91.
- [5] 高新昊, 江丽华, 刘兆辉, 等. 山东省农村地区地下水硝酸盐污染现状调查与评价[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 89-93.
GAO Xin-hao, JIANG Li-hua, LIU Zhao-hui, et al. Investigation and evaluation on Nitrate contamination status of groundwater in rural areas of Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(1): 89-93.
- [6] Durka W, Schulze E D, Gebauer G, et al. Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ^{15}N and ^{18}O measurements[J]. *Nature*, 1994, 372(6508): 765-767.

- [7] 曾庆飞,孔繁翔,毛志刚,等. 稳定性氮同位素技术研究太湖梅梁湾区域营养盐差异[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4):813-818.
ZENG Qing-fei, KONG Fan-xiang, MAO Zhi-gang, et al. Evaluation of nitrogen isotopes as indicators of spatial nutrient difference in Meiliangwan Bay, Tai Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):813-818.
- [8] 夏永秋,李跃飞,张心昱,等. 太湖地区稻作系统不同水体硝态氮同位素特征及污染源[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2):505-510.
XIA Yong-qiu, LI Yue-fei, ZHANG Xin-yu, et al. Nitrogen isotopic characteristics and source attribution of nitrate in different water bodies in the paddy rice system of the Taihu Lake region[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(2):505-510.
- [9] Heathwaite A, Johnes P J. Contribution of nitrogen species and phosphorus fractions to stream water quality in agricultural catchments[J]. *Hydrological processes*, 1996, 10(7):971-983.
- [10] 邢 萌,刘卫国,胡 婧. 浐河、涝河河水硝酸盐氮污染来源的氮同位素示踪[J]. 环境科学, 2010, 31(10):2305-2310.
XING Meng, LIU Wei-guo, HU Jing. Using nitrate isotope to trace the nitrogen pollution in Chanhe and Laohe River[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10):2305-2310.
- [11] Martine M S, George S, Anna S, et al. Nitrate isotopes unveil distinct seasonal N-sources and the critical role of crop residues in groundwater contamination[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 381(1):134-141.
- [12] 肖红伟,肖化云,龙爱民,等. 贵阳地区大气降水中 $\delta^{15}\text{N}$ - NO_3 组成及来源分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4):940-945.
XIAO Hong-wei, XIAO Hua-yun, LONG Ai-min, et al. Nitrogen isotopic composition and source of nitrate in precipitation at Guiyang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4):940-945.
- [13] 李思亮,刘丛强,肖化云,等. $\delta^{15}\text{N}$ 在贵阳地下水氮污染来源和转化过程中的辨识应用[J]. 地球化学, 2005, 34(3):257-262.
LI Si-liang, LIU Cong-qiang, XIAO Hua-yun, et al. Using $\delta^{15}\text{N}$ to assess groundwater nitrogen pollution in Guiyang[J]. *Geochimica*, 2005, 34(3):257-262.
- [14] 李跃飞. 秦淮河氮、磷时空动态特征及基于硝态氮同位素方法的氮源辨别[D]. 南京农业大学, 2013:7-9.
LI Yue-fei. Temporal and spatial variations of nitrogen and phosphorus and the nitrogen source in the Qinhuai River using the stable nitrate-nitrogen isotopes[D]. Nanjing Agricultural University, 2013:7-9.
- [15] Silva S, Kendall C, Wilkison D H, et al. A new method for collection of nitrate from fresh water and the analysis of nitrogen and oxygen isotope ratios[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1/2):22-36.
- [16] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. GB 3838—2002 Surface water environmental quality standards[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] 吴成龙,沈其荣,夏昭远,等. 麦-稻轮作系统有机无机肥料配施协同氮素转化的机制研究 I. 小麦季 ^{15}N 去向分析[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):905-912.
WU Cheng-long, SHEN Qi-rong, XIA Zhao-yuan, et al. Mechanisms for the increased utilization of fertilizer N under integrated use of inorganic and organic fertilizers in a winter wheat-rice rotation system; I. Fate of fertilizer ^{15}N during winter wheat growing stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):905-912.
- [18] 林晶晶,李刚华,薛利红,等. $\delta^{15}\text{N}$ 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8):1424-1434.
LIN Jing-jing, LI Gang-hua, XUE Li-hong, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ^{15}N tracer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8):1424-1434.
- [19] 唐艳凌,章光新. 流域非点源污染物输出的环境因子分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):725-732.
TANG Yan-ling, ZHANG Guang-xin. Analysis of environmental factors influencing non-point source pollutants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):725-732.
- [20] 张翠云,郭秀红. 氮同位素技术的应用:土壤有机氮作为地下水硝酸盐污染源的条件分析[J]. 地球化学, 2005, 34(5):533-540.
ZHANG Cui-yun, GUO Xiu-hong. Applications of nitrogen isotope techniques: The prerequisite analysis of soil organic nitrogen as sources of nitrate contamination of groundwater[J]. *Geochimica*, 2005, 34(5):533-540.