

基于质量平衡方程的浑河上游清原流域氮素时空变化

石新竹, 魏建兵*, 刘景琦, 吴尚遇 (沈阳大学环境学院, 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110044)

摘要 以浑河上游的清原流域为例, 对水源保护区存在的氮素污染问题进行探讨, 采用质量平衡方程结合 ArcGIS 空间分析的方法, 研究流域尺度氮素收支的时空动态及其影响因素。结果表明, 研究区氮输入以化肥施用为主, 输入总量为 15 492.02 t, 其中化肥占总输入量的 49%, 氮沉降占比为 25%, 氮矿化占 26%; 研究区的氮输出总量为 6 305.67 t, 氨挥发和植物吸收作为研究区最主要的 2 种输出方式, 二者的氮输出总量占研究区氮输出总量的 90%; 研究区氮盈余为 9 186.45 t, 氮盈余约占氮输入总量的 59%; 从整体上看, 研究区氮盈余量随四季动态变化, 春季和夏季的氮盈余较高于秋季和冬季, 并在土地利用类型上呈现出耕地面积较大和上游两岸地区的盈余量较高于其他地区。

关键词 氮素; 质量平衡方程; 时空变化; 水源保护区; 浑河上游清原流域

中图分类号 X524 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)09-0072-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.09.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Temporal and Spatial Variation of Nitrogen in Qingyuan Basin in Upper Hunhe River Based on Mass Balance Equation

SHI Xin-zhu, WEI Jian-bing, LIU Jing-qi et al (College of Environment, Shenyang University, Key Laboratory of Eco-restoration of Regional Contaminated Environment, Ministry of Education, Shenyang, Liaoning 110044)

Abstract Taking the Qingyuan Basin in the upper Hunhe River as an example, the N pollution problem in the water source protection area was discussed. The mass balance equation combined with ArcGIS spatial analysis method was used to study the temporal and spatial dynamics of the nitrogen budget at the basin scale and its influencing factors. The results showed that the nitrogen input in the study area was mainly chemical fertilizer application, with a total input of 15 492.02 t, in which chemical fertilizer accounts for 49% of the total input, nitrogen deposition accounts for 25%, and nitrogen mineralization accounts for 26%. The total output of nitrogen in the study area was 6 305.67 t ammonia volatilization and plant absorption were the two most important output modes in the study area, and their total output of nitrogen accounts for 90% of the total output of nitrogen in the study area. The nitrogen surplus in the study area was 9 186.45 t, accounting for about 59% of the total nitrogen input. On the whole, the nitrogen surplus in the study area changed dynamically with the seasons. The nitrogen surplus in spring and summer was higher than that in autumn and winter. In terms of land use types, there were more cultivated land and the surplus in the upstream banks was higher than that in other areas.

Key words Nitrogen; Mass balance equation; Temporal and spatial variation; Water source protection zone; Qingyuan Basin in the upper Hunhe River

随着国家对污染治理的重视和技术的增强, 点源污染已经得到良好控制, 而非点源污染问题却没能有效治理, 非点源污染是由于农用耕地、城市街道路面、污水和生活垃圾等分散排放造成的, 影响因素较多且难以控制, 目前仍没有得到有效治理。随着“生态文明”战略的实施和公众环保意识的逐步增强, 作为集中式湖库型水源地流域点源污染已经得到较好的控制, 我国面临的主要水体污染问题也由点源污染逐步转变为非点源污染^[1], 尤其是农业非点源, 据调查, 农业总氮、总磷排放量分别占总排放的 57.2% 和 67.4%^[2]。我国的化肥使用量非常大, 约占全球使用量的 31%, 总量超出其他国家 1 倍, 但农药利用率不到使用量的 30%, 约 70% 的 N、P 汇入水体^[3], 对作为水源地的湖库水体质量造成了严重的威胁。

浑河上游流域是大伙房集水区, 作为国家九大集中式饮用水源地之一, 为抚顺、鞍山、营口等 7 大城市提供充足的水资源。2014 年 9 月被国务院批准确定为国家重点保护和优先修复的湖泊水库之一, 然而时至今日, 根据环境部门的监测, COD 出现下降, 但 N、P 污染超标问题的解决依然面临挑

战。通过实地考察, 农业非点源污染是研究区现在主要污染来源。笔者以浑河上游清原流域为研究区, 针对流域地表水体的氮污染问题, 在污染特征调查评价的基础上, 利用氮质量平衡模型模拟流域氮收支空间分异性和季节动态, 为流域削减氮素污染的治理实践提供科学数据和决策依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 浑河清原流域位于清原满族自治县境内, 包括境内的 9 个乡镇, 面积 2 232 km², 是大伙房水库的上游流域, 也是浑河的发源地, 坐标为 124°20'06"~125°28'58"E、41°47'52"~42°28'25"N, 与吉林省相邻(图 1)。整个流域均属于大伙房水库的集水区, 区内社会经济以森林经营和农业生产为主, 2017 年人口 21.23 万, GDP 38.22 亿元。研究区位于长白山脉西南的边缘, 属于长白山龙岗支脉。区域内多为低缓圆滑的山丘形态, 中部河流冲击形成的河谷平原是主要的耕种区域。整体以众多河流、山涧沟谷为网络, 形成了丘陵、沟谷相互交错的地貌特征。

研究区属于中温带大陆性季风气候, 降雨主要集中在夏季, 春季和秋季有少量降雨, 年平均降水量在 800 mm 左右。森林是研究区最主要的土地利用类型, 旱田和少量水田位于河流两侧谷地。植被种类丰富, 植被类型以森林为主, 树种多达 130 余种, 主要的树种有樟子松、辽东栎、落叶松、红松林等。土壤有机质含量高, 以棕壤为主(80%)。

1.2 研究方法 流域尺度的氮收支采用 N 素输入输出质量

基金项目 国家自然科学基金项目(41771200, 41171399)。

作者简介 石新竹(1997—), 女, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 研究方向: 环境可持续发展与规划。*通信作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事景观生态学、流域水土环境治理研究。

收稿日期 2021-08-18



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

平衡方程^[4]。以乡镇区域和土地利用类型为单元,数据来源为 2015 年清原县土地利用调查矢量数据和 2017 年的现场测绘调查修订,采用收集数据、实地观测、模型指南推荐等综合方法,参数化每个空间单元上的输入输出量,依据潜在 N 超负荷量值判别流域潜在的 N 源和 N 汇,使用 ArcGIS 10.2 软件制图和分析其年内四季时空分布动态格局(2017 年)。建立质量方程如下:

$$X = (I + F + M) - (U + D + V) \quad (1)$$

式中, X 为潜在超负荷氮量(kg); I 为干湿沉降(kg); F 为化肥输入氮量(kg); M 为土壤氮矿化(kg); U 为植物吸收量(kg); D 为土壤反硝化(kg); V 为氨挥发量(kg)。

1.2.1 干湿沉降监测与计算。在浑河上游清原流域,综合考虑研究区的地貌与水系分布、社会活动与土地利用、人口分布与周边地区情况,在上、中、下游的湾甸子镇、敖家堡乡、清原县城、红透山镇、北三家子镇共设置 5 个具有代表性的干湿沉降监测点。干沉降样品利用内径为 20 cm 的玻璃集尘缸进行采集,每月采集一次,湿沉降采用聚乙烯塑料桶(口径 50 cm、高 30 cm)收集,每次降雨或降雪后进行采集。所有采集到的样品进行冷冻处理,送回实验室后对总氮和硝态氮、铵态氮进行测定^[5]。干、湿沉降通量计算公式如下^[6-7]:

$$I_d = \frac{C \times V}{f \times s} \quad (2)$$

$$I_w = \sum (P \times C / 100) \quad (3)$$

式中, I_d 为大气氮干沉降通量(kg/km²); V 为干沉降提取液体积(L); C 为氮沉降浓度(mg/L); s 为集尘缸的面积(cm²); f 为采样时间系数。 I_w 为大气氮湿沉降通量(kg/km²); P 为每个月的降雨量(mm)。

1.2.2 化肥施用。通过查阅《清原县统计年鉴》(2017 年),研究区施用的含氮元素肥料仅有氮肥和复合肥 2 种,并且尿素的施用量远大于复合肥的施用量,根据我国化肥折纯率得到,尿素的折纯率为 46%,复合肥的折纯率为 18%^[8]。根据统计年鉴中不同化肥的施用量与其相应的折纯率,通过公式(4)计算出化肥施用的 N 素总量。

$$F = \sum (A \times X_i) \quad (4)$$

式中, F 为化肥 N 素折纯量(kg); A 为折纯率; X_i 为 i 类化肥总量(kg)。

1.2.3 土壤氮矿化量。根据质量平衡方程中氮矿化估算方法,先确定各土地利用类型的氮矿化系数,其中森林的氮矿化系数为 12.57 kg/(hm²·a),耕地的氮矿化系数为 4.12 kg/(hm²·a)^[9]。面积与矿化系数之积即为土壤矿化量,土壤矿化量受温度影响较大,因此各个季节的氮矿化量不尽相同,春季、夏季、秋季、冬季的氮矿化系数比为 2:5:2:1^[10]。土壤矿化量计算公式如下:

$$M = \sum (I \times S) \quad (5)$$

式中, M 为土壤矿化量(kg); I 为矿化系数[kg/(hm²·a)]; S 为土地类型面积(hm²)。

1.2.4 氨挥发量。通过查阅国内外氨估算方法并参考我国发行的《大气氨源排放清单编制技术指南》对研究区的氨挥发量进行估算^[11-12],计算公式如下:

$$E = \sum (A_i \times EF_i) \quad (6)$$

式中, E 为氨挥发量(kg); A_i 为 i 种氨的挥发量(kg); EF_i 为氨挥发类型 EF_i 排放因子。根据《大气氨源排放清单编制技术指南》相关系数计算,林地排放因子为 0.02 g/(m²·a)^[13];尿素排放因子为 20.85%;复合肥排放因子为 4%;生物质燃烧

排放因子为 $1.32 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$; 人体排放因子 $0.787 \text{ kg}/(\text{a}\cdot\text{人})$; 土地本底排放因子为 $1.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ^[14]。

1.2.5 反硝化通量。根据质量平衡方程指南手册中的推荐值和研究区的气候特征,结合与辽东地区相关的研究结果,确定林地、旱田、水田的反硝化系数分别为 1.95、9.10、12.70^[15]。土壤反硝化在季节上变化较为明显,春季、夏季、秋季、冬季的权重分别为 0.45、0.15、0.30、0.10。反硝化通量计算公式如下:

$$D = \sum (A \times S_i) \quad (7)$$

式中, D 为反硝化通量 (kg); S_i 为 i 类土地利用类型的土地面积 (hm^2); A 为反硝化系数。

1.2.6 植物吸收量。氮输出的重要环节是植物吸收,不同土地利用类型的植物吸收氮素系数分别为森林 $8.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、水田 $9.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、旱田 $25.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[16]。根据研究区的气候条件,植物生长发生在春季、夏季和秋季,植物吸收量在这 3 个季节的占比分别为 0.25、0.60 和 0.15。通过植物吸收系数计算植被吸收的 N 素总量,并按照比重分配给各个季节,具体计算公式如下:

$$U = \sum (a \times S_i) \quad (8)$$

式中, U 为植物吸收的 N 素总量 (kg); S_i 为 i 类植被的土地面积 (hm^2); a 为植物吸收系数。

2 结果与分析

2.1 流域土地利用 清原流域土地总面积为 $2\,231.86 \text{ km}^2$,其中林地面积占比最大(表 1),水系较为丰富。从土地利用的空间分布(图 2)来看,森林是整个流域的基底,农田和建设用地分布于干流和各级支流的两侧沟谷地带。

表 1 清原流域土地利用类型及面积

Table 1 Types and area of land use in Qingyuan Basin

土地利用类型 Land use type	面积 Area/ km^2	占比 Percentage//%
林地 Forest	1 754.37	78.61
水田 Paddy field	33.81	1.52
旱田 Dry field	359.18	16.09
水域 Waters	29.98	1.34
工矿 Industrial and mining	5.39	0.24
草地 Grassland	2.53	0.11
建设用地 Construction land	43.72	1.96
未利用地 Unused	2.88	0.13
合计 Total	2 231.86	100

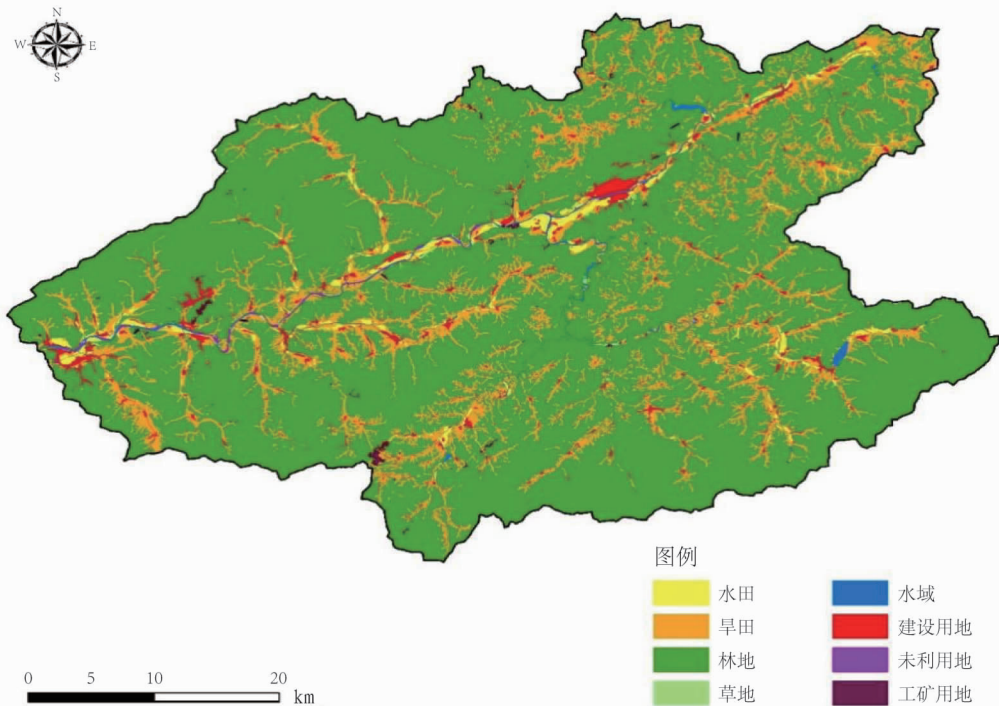


图 2 清原流域土地利用的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use in Qingyuan Basin

2.2 流域氮盈余 利用质量平衡方程分别从流域乡镇分布和土地利用类型 2 个方面对氮收支进行计算和空间表达,结果发现(表 2),整个流域的氮输入总量为 $15\,492.02 \text{ t}$,其中化肥的施用占氮输入总量的 49%,为 $7\,583.54 \text{ t}$,是流域内氮输入的主要途径,氮沉降 $3\,851.52 \text{ t}$,占 25%,氮矿化 $4\,056.96 \text{ t}$,占 26%;氮输出总量为 $6\,305.67 \text{ t}$,其中植物吸收 $2\,615.95 \text{ t}$,氮挥发 $3\,059.53 \text{ t}$,土壤反硝化 630.19 t ,氮挥发和植物吸收两者占总输出量的 90%;氮盈余总量为 $9\,186.45 \text{ t}$,占氮输入

总量的 59%,流域氮盈余量均值为 38.65 t 。从总体上看,流域的氮盈余量较高。

2.3 乡镇氮盈余量分布 根据各乡镇分区盈余量数据(表 2)和季节权重,利用 ArcGIS 反距离权重插值法得到各个乡镇 4 个季节的氮盈余量空间分布图(图 3)。从总体上看,研究区浑河中部干流一带的盈余量相对较大,呈现出中部向周围逐渐递减的趋势,东南区域的氮盈余量相对较小,敖家堡乡和英额门镇除秋季中等外,其他季节的氮盈余量都较高,

这两个乡镇农田面积比重大、农业活动较多,畜禽散养和化肥的管理应该受到关注。同一乡镇在不同季节的氮盈总体上来看春季>夏季>秋季>冬季。

表 2 各个乡镇的氮盈余量^[17]

Table 2 Nitrogen surplus in each township

乡镇 Township	输入 Input			输出 Output			盈余 Surplus	
	肥料 Fertilizer	氮沉降 Nitrogen deposition	氮矿化 Nitrogen mineralization	氨挥发 Ammonia volatilization	反硝化 Denitrification	植物吸收 Plant absorption	总量 Total	均值 Mean
北三家 Beisanjia	762.32	463.44	465.65	282.82	69.13	292.21	1 047.35	38.42
敖家堡 Aojiabao	672.33	275.06	283.37	197.53	48.28	193.31	791.64	46.06
大苏河 Dasuhe	577.12	357.97	480.46	209.11	65.01	286.01	855.42	31.07
构乃甸 Gounaidian	695.48	375.91	350.75	348.05	55.61	229.15	789.33	37.79
清原镇 Qingyuan Town	986.04	691.12	505.36	468.47	79.74	328.95	1 305.36	43.45
红透山 Hongtoushan	572.05	340.66	341.54	290.61	51.11	215.37	697.16	34.80
英额门 Ying'e men	1 333.59	447.45	448.16	494.47	84.38	325.70	1 324.55	47.37
南口前 Nankouqian	1 067.46	601.99	564.03	472.54	88.06	364.63	1 308.35	39.12
湾甸子 Wandianzi	917.15	297.92	617.64	295.93	88.87	380.62	1 067.29	29.73
合计 Total	7 583.54	3 851.52	4 056.96	3 059.53	630.19	2 615.95	9 186.45	38.65

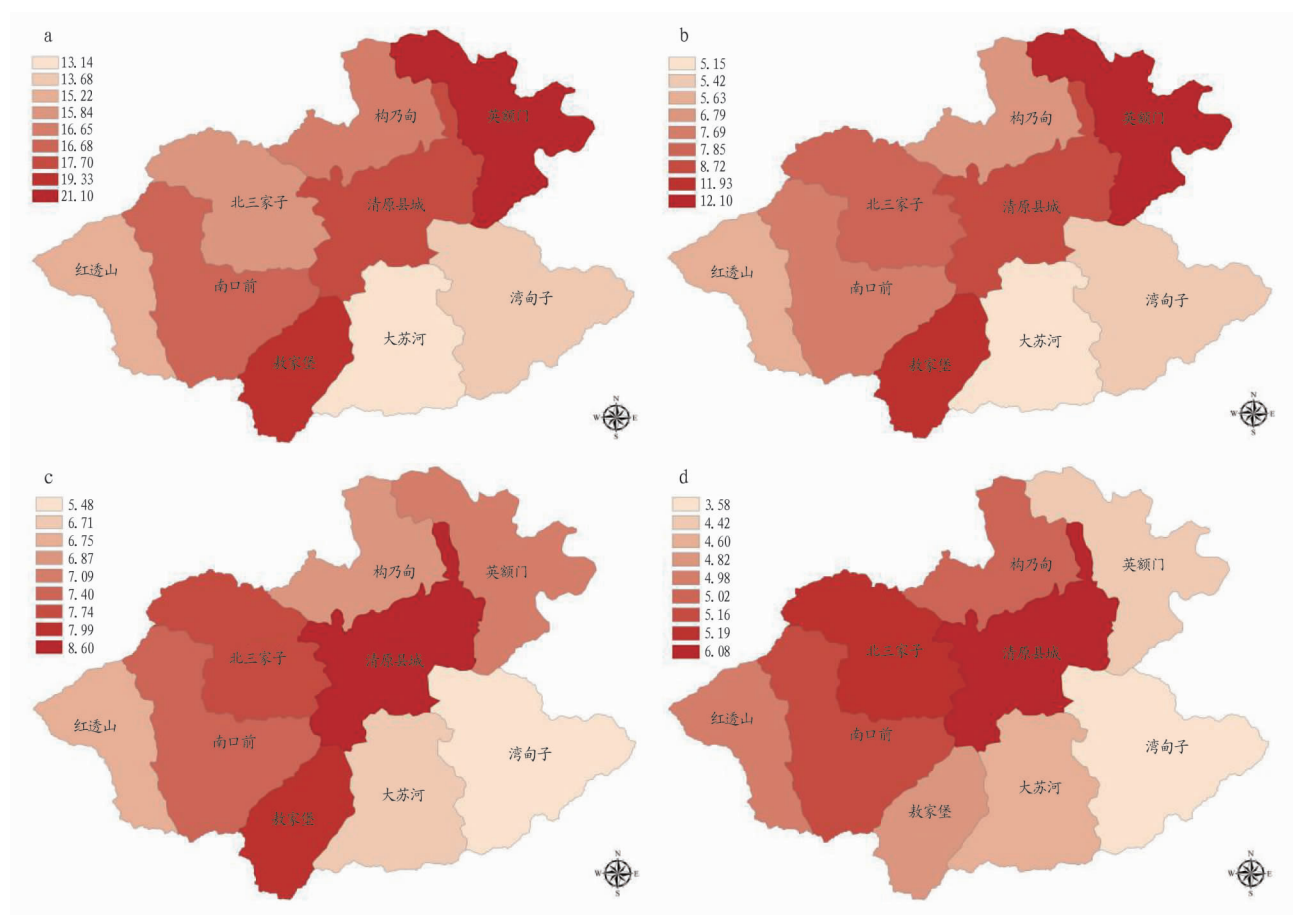
图 3 各个乡镇春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)氮盈余量空间分布(单位:kg/hm²)

Fig. 3 Spatial distribution of nitrogen surplus in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) in each township

整个流域的氮盈余总量为 9 186.45 t,9 个乡镇中氮盈余总量较多的有清原镇、南口前、英额门、敖家堡、构乃甸和红透山的氮盈余总量较小。同一乡镇不同季节之间的氮盈余量差异也很大,主要由于耕地占比、化肥施用以及人为活动等因素导致,总体上呈现出春季>夏季>秋季>冬季的趋势。

流域主要的氮输入方式是化肥施用,占 49%,施用氮肥为尿素和复合肥,氮肥输入量 7 583.54 t,氮肥输入量相对较

高的乡镇有湾甸子、清原镇、英额门和南口前,氮肥输入量较低的乡镇有敖家堡、红透山和大苏河。土壤氮矿化也是氮输入的方式之一,湾甸子和南口前的乡镇面积均超过了 30 000 hm²,面积较大于其他乡镇,氮矿化总量也相对较大,湾甸子和南口前 2 个乡镇的面积虽相近,但湾甸子森林面积较大,因此氮矿化量与南口前相差较多。

流域主要的输出方式是氨挥发和植物吸收,占 90%。氨

挥发总量为 3 059.53 t, 氨挥发总量最高的乡镇是英额门镇。氨挥发占比较大的是施肥排放和畜禽排放, 两者占总挥发的 93%。研究区森林和农田面积较大, 植物和农作物的生长期主要在春夏季。由于植被丰富和耕地面积较大, 导致英额门、南口前、湾甸子、清原镇 4 个乡镇的植物吸收量高于其他几个乡镇。

2.4 各土地利用类型氮盈余及其时空分布 计算流域各土地利用类型的氮盈余量, 通过对肥料、氮沉降、氮矿化、氨挥发、反硝化、植物吸收 6 种参数各季节的权重计算, 得到不同土地利用类型的四季氮盈余量(表 3), 运用 ArcGIS 属性赋值和空间制图得到氮盈余 4 个季节空间分布图(图 4)。从图 4

可以看出, 林地的氮盈余情况总体偏低, 春季、夏季旱田和水田的氮盈余明显高于其他土地利用类型, 秋冬季的氮盈余主要来自建设用地和旱田。

表 3 各季节的氮盈余

Table 3 Nitrogen surplus in each season kg/hm^2

季节 Season	林地 Forest	旱田 Dry field	水田 Paddy field	建设用地 Construction land
春季 Spring	4.55	79.23	52.06	7.10
夏季 Summer	0.03	55.67	32.34	16.95
秋季 Autumn	3.16	11.44	6.30	11.98
冬季 Winter	3.36	0.51	-0.96	8.37

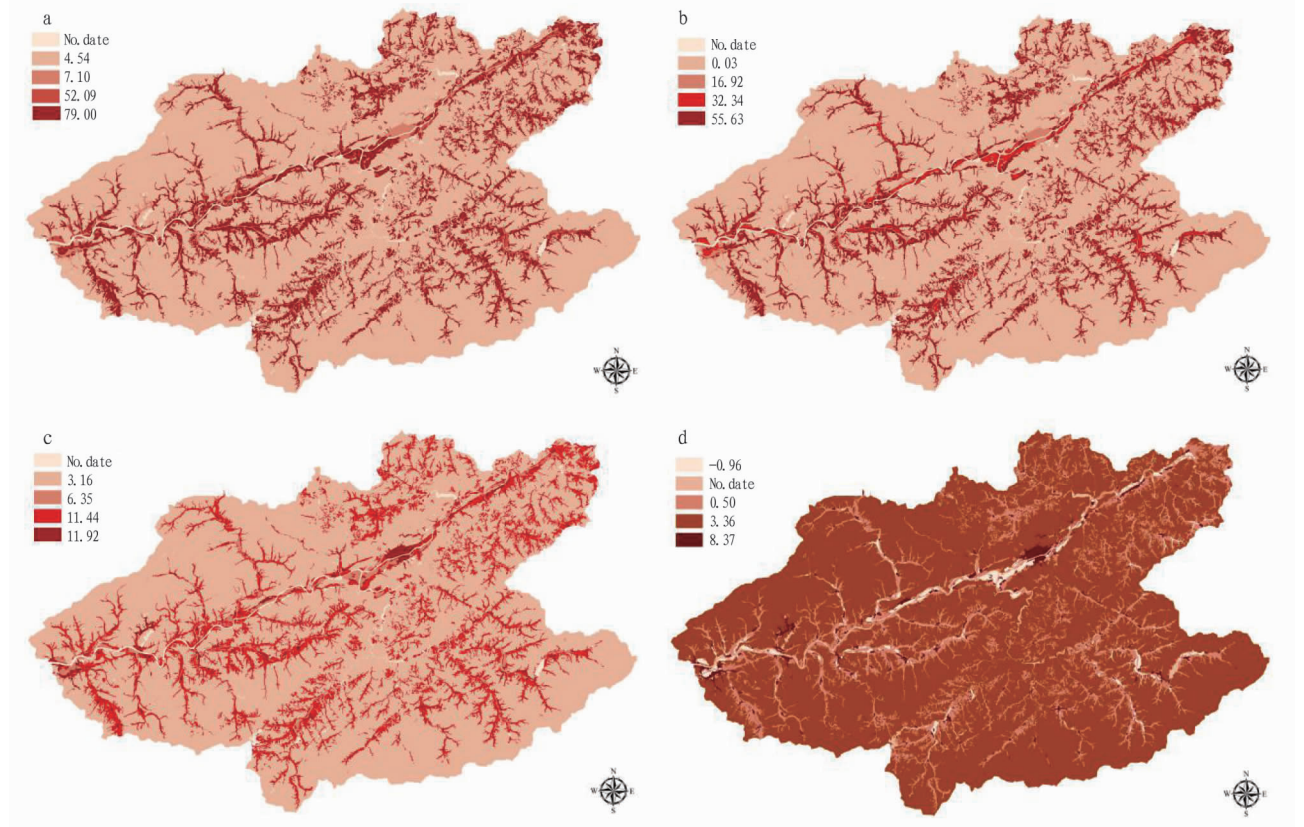


图 4 土地利用类型春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)氮盈余空间分布(单位: kg/hm^2)

Fig. 4 Spatial distribution of nitrogen surplus in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) of land use types

从土地利用类型上来看, 旱田和水田是氮盈余主要的土地利用类型, 且秋冬季的盈余量明显小于春夏季, 是由于该地区氮输入的主要来源为化肥施用。

在春夏两季旱田和水田的氮盈余明显高于林地和建设用地, 主要由于耕地施肥和湿沉降, 湿沉降主要发生在夏季, 夏季温度升高且降雨较多, 农业生产中施用的化肥中的氨气和畜禽养殖中产生的氨气更容易挥发到大气中, 再通过降雨返回到地表。秋冬两季的氮盈余主要来自建设用地和旱田。由于秋冬季的降雨和降雪相对减少, 人类活动、秋季秸秆燃烧和冬季农村的生物质燃烧以及城市供暖产生的大量有机氮和氧化物物质大部分以干沉降的方式返回地表。浑河清原流域主要以森林景观为主, 近几十年通过关闭污染型企业 and 截封排污口等一系列环境整治措施, 点源污染已经得到很好

的控制, 但该地区农村居民点较多, 农田面积大, 人类活动、施肥、畜禽养殖等非点源污染成为主要的污染方式, 导致流域内氮素盈余。但与其他地区相比(表 4), 该流域氮盈余量处于较低的水平。

该研究区与其他流域研究区域主要的输入氮源都直接与农田相关, 化肥已成为最大的氮源, 因此加强农田氮素的管理是非常必要的。

经济发达程度对氮污染也有很大影响, 该研究区处于水源保护区, 森林景观面积大, 且以农业种植和畜牧养殖为主, 相比于其他研究区, 经济发展较为缓慢, 没有工业污染源, 氮输入量相对处于较低水平。与其他的国内流域研究区相比, 该研究区的氮盈余水平相对较低, 对环境影响较小, 但该流域作为大伙房水库饮用水源的集水区, 通过退耕还林、分散

源污染控制、测土施肥等措施进一步改善水源保护区的水质还是很必要的,另外,如何在限制工业与城镇开发和保护生态环境的背景下转变经济发展方式、创新生态补偿机制、提

升当地居民的收入水平是急需研究和解决的环境与经济协调发展的问题。

表 4 该研究区流域氮盈余与国内其他流域对比

Table 4 Comparison of nitrogen surplus between the study area and other basins in China

区域 Area	氮输入 Nitrogen input//t	氮输出 Nitrogen output//t	氮盈余 Nitrogen surplus//t	氮通量 Nitrogen flux/kg/(hm ² ·a)
该研究 This study	15 490.50	6 304.50	9 186.00	27.25
湛江湾 Zhanjiang Bay ^[18]	53 718.55	44 536.75	9 181.80	200.11
长江三角洲 Yangtze River Delta ^[19]	2 940 000.00	1 660 000.00	1 280 000.00	244.00
三峡库区紫色土坡耕地 Purple soil slope farmland in the Three Gorges Reservoir area ^[20]	31 895.92	16 035.94	15 859.98	258.77
北江流域 Beijiang River Basin ^[21]	395 200.00	298 500.00	96 700.00	84.61

3 结论与讨论

(1) 清原流域氮输入总量为 15 492.02 t, 氮输出总量为 6 305.67 t, 氮盈余总量为 9 186.45 t。在氮的输入方面, 清原流域最主要的氮源是化肥, 占总输入量的 49%, 氮沉降和氮矿化分别占 25% 和 26%, 氮源分布的地区差异较大。在氮的输出中, 氨挥发和植物吸收两者占总输出量的 90%。氮盈余约占氮输入总量的 59%, 分布在大气、植物秸秆、土壤中, 随着径流进入水体后, 对流域造成污染。

(2) 由于清原流域内各乡镇的土地面积、土地利用类型、耕地、林地等自然因素和人口密度等差异, 在季节和时空分布上, 不同地区单位面积的氮盈余也存在较为显著的差异, 春夏季的盈余量较高, 秋冬季的盈余量较低; 从空间分布上看, 相对于其他地区, 流域两岸和耕地面积较大的地区氮盈余量较高。

(3) 通过调查整个清原流域的畜禽养殖和化肥施用量很大, 从而增加了氨排放量。因此, 加强农田氮素管理、重视人畜排泄物等有机肥的利用、对动物排泄物进行资源化利用是减少氮污染的有效途径, 同时引进先进的技术, 对作物秸秆进行处理生成有机肥, 加强畜禽粪便有效利用的同时减少焚烧秸秆对环境造成的污染。

(4) 浑河上游生态环境相对优良, 但经济发展和人民生活水平较低, 如何协调二者之间的关系, 维护区域的可持续发展是未来急需深入研究的问题之一。

参考文献

[1] 李辉耀, 周建红. 中国农业非点源污染现状及研究概况[J]. 世界环境, 2019(2): 64-65.
 [2] ALM A L. Regulatory Focus: Nonpoint sources of water pollution[J]. Environmental science and technology, 1990, 24(7): 967.

[3] GILLILAND M W, BAXTER-POTTER W. A geographic information system to predict non-point source pollution potential[J]. Water resources bulletin, 1987, 23(2): 281-291.
 [4] CANTON M, ANSCHUTZ P, COYNEL A, et al. Nutrient export to an Eastern Atlantic coastal zone: First modeling and nitrogen mass balance[J]. Biogeochemistry, 2012, 107(1/2/3): 361-377.
 [5] 陈能汪. 九龙江流域氮的源汇过程及其机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
 [6] 赵宏伟, 李橙, 杨晶, 等. 岗南水库上游流域大气氮干湿沉降研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 115-121.
 [7] 许志波, 杨仪, 卞莉, 等. 太湖大气氮、磷干湿沉降特征[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(4): 37-42.
 [8] 全国煤化工信息网. 2014 年 1 月—7 月全国化肥生产情况(折纯量)[J]. 煤化工, 2014, 42(5): 49.
 [9] 王伟, 于兴修, 刘航, 等. 农田土壤氮矿化研究进展[J]. 中国水土保持, 2016(10): 67-71.
 [10] 吴迪, 崔晓阳, 郭亚芬. 寒温带林区不同林型下土壤中氮矿化特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 122-129.
 [11] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市主城区 NH₃ 排放估算及分布特征分析[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(10): 65-70.
 [12] 廖章泽. 浑河上游典型小流域土壤氨挥发通量研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2020.
 [13] 肖红伟, 肖化云, 唐从国, 等. 贵阳地区氨排放量估算[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 21-25.
 [14] 杨新明, 周伟, 韩磊, 等. 济南市 2010-2015 年农业源氨排放量估算及分布特征[J]. 环境保护科学, 2017, 43(6): 90-93, 106.
 [15] 孔潇. 浑河上游土壤反硝化潜力研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2020.
 [16] 张玉铭, 董文旭, 曾江海, 等. 玉米地土壤反硝化速率与 N₂O 排放通量的动态变化[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(4): 70-72.
 [17] 郑尧文, 魏建兵, 张娜, 等. 浑河上游清原流域河流氮素污染时空变异及其与土地利用的关系[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2020, 32(2): 123-131, 183.
 [18] 孟亚飞, 陈法锦, 肖波, 等. 湛江湾区域氮收支估算[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(1): 76-81.
 [19] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1709-1716.
 [20] 刘京, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡库区紫色土坡耕地小流域磷收支估算及污染潜势[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1385-1392.
 [21] 陈法锦, 贾国东. 北江流域氮收支估算[J]. 热带地理, 2009, 29(1): 11-15.