

基于模型的上海郊区地下水氮素 非点源污染特征研究

黄秀梅, 申广荣*, 周 培

(农业部都市农业(南方)重点开放实验室, 上海交通大学, 上海 200240)

摘 要:农业非点源污染是造成上海郊区地下水污染的主要因素,定量分析预测农业生产过程氮素的迁移转化规律是有效控制地下水污染的重要环节。以上海市浦东新区新场镇果园村的桃园为研究对象,借助生物地球化学过程模型(DNDC)和长期水文影响评价模型(L-THIA),基于连续观测数据,详细分析了农业生产过程中氮素造成的非点源污染,特别是对周边地表、地下水的影响。结果表明,地表水总氮均值达 $6.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远劣于地表水 V 类标准($\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);地下水中总氮均值达 $16.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远劣于地表水 V 类标准($\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。约有 20% 采样点硝态氮含量属于地下水 V 类($>30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。野外检测数据表明,该区地表水、地下水污染均严重超标,不宜饮用。模型分析显示,水体污染源主要来自桃园生产中施用的肥料,其中就模拟结果的数值可以得出,大约年农田氮输入量的 1.7% 通过土壤径流进入地表水,约 3.5% 经过土壤渗漏进入地下水,实测地下水中氮含量占桃园总氮输入量的 5.8%。因此,合理调整施肥措施和施肥结构是减少土壤-水体中氮素污染的有效途径。

关键词:L-THIA 模型;氮素含量;非点源污染;DNDC;桃园

中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)07-1378-07

Modeling Impacts of Cropland Non-point Source Nitrogen Pollution on Groundwater in a Suburban Area of Shanghai, China

HUANG Xiu-mei, SHEN Guang-rong*, ZHOU Pei

(Key Laboratory of Urban Agriculture(South) of Ministry of Agriculture, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Non-point source pollution has been recognized as a major factor causing groundwater contamination in suburban areas of Shanghai. It's crucial for mitigating the groundwater contamination to quantify leaching losses of nitrogen(N) from the agricultural fields. This paper reports a study on N biogeochemical cycling with field measurement and model simulation for a typical orchard planted with peach and vegetables in Guoyuan Village, Xinchang Town, Pudong District, Shanghai. Samples of surface water, groundwater and soil were collected and analyzed to obtain N contents in the agro-ecosystem. The results showed that both of the surface and groundwater were polluted so seriously that they were not suitable to drink. The average content of total nitrogen in surface water was $6.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $16.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the groundwater, both of them were over the standard of Grade V surface water($\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) according to the national standard(GB 3838—2002). In addition, the content of nitrate nitrogen from about 20% of the sampling sites fell into Grade V groundwater ($>30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) based on the national standard(GB/T14848—1993). Two models, a process-based biogeochemical model DNDC and a empirical hydrologic model L-THIA, were employed to interpret and extrapolate field observations. The modeled results indicated that about a half of the total N input of $581 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ were absorbed by the crops and lost as N gases, and about $293 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ were accumulated in the soil and hence became available for leaching loss. L-THIA simulated N losses through leaching and found about 1.7% of annual accumulated soil N leached into the surface water via the surface runoff and 5.8% to the groundwater and 3.5% in the soil liquid phase. The methodologies utilized in the study could serve groundwater pollution mitigation related to agricultural production in Shanghai.

Keywords: L-THIA model; nitrogen content; non-point source pollution; DNDC; peach orchard

收稿日期:2010-10-27

基金项目:2008 年上海自然科学基金项目(09ZR1415200);上海市科委重大项目(08dz1900404)

作者简介:黄秀梅(1986—),女,江西黎川人,硕士研究生,主要从事环境污染和地理信息技术研究。E-mail:hxm05@sjtu.edu.cn

* 通讯作者:申广荣 E-mail:sgrong@sjtu.edu.cn

随着点源污染的有效管理和控制,非点源污染已成为地表和地下水环境污染的主要因素。在各类非点源污染中,农业非点源污染最为突出^[1-4],尤其是在以蔬菜、果园地为主的上海郊区。由于农业生产活动引起的各种污染物以低浓度、大范围的形式缓慢地在土壤圈内运动和从土壤圈向水圈扩散,引起地表和地下水环境污染。据调查,上海地区非点源污染已经超过水污染总量的一半^[5],对农田非点源污染进行研究具有重要的科学意义和应用价值。非点源污染特征及负荷估算是区域水环境质量控制的重要环节。目前已有的众多研究主要包括降水总量与污染负荷之间的关系研究^[6],利用模型(L-THIA)估算非点源污染物的长期平均输出负荷^[6],农田降雨径流污染负荷模型的建立^[7],以及采用流域非点源 SWAT 模型系统,针对不同的流域管理情景进行情景分析等^[8]农业非点源污染负荷方面的研究;关于农业非点源污染特征主要包括分析土地利用类型、地形等因素对非点源输出特征的影响及其非点源污染物流失的时空变化规律等^[9-10]。

本研究以上海市浦东新区新场镇果园村的桃园为研究对象,借助生物地球化学过程模型 DNDC 和 L-THIA 模型以及同步观测的流域土壤、地表地下水氮素含量,分析探讨基于农业生产管理措施及其农业生产过程的流域氮素非点源污染特征,旨在为减少或避免氮的流失与污染,实现研究区非点源污染的有效监测和桃园生产的多目标管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海市浦东新区新场镇果园村位于黄浦江东岸,地理位置为北纬 31°03′,东经 121°39′(图 1),属亚热

带季风性气候,地势平坦,海拔为 4 m(Google earth 显示),年平均气温约 15.7℃,年降水量约 1100 mm,降水集中在 7—9 月,该区雨量年际变化较大,多雨年份可达 1 300 mm,少雨年份只有 300 mm^[11]。该区水蜜桃历史悠久,早在 1621 年就有文献记载。2005 年,南汇水蜜桃被国家质监总局批准为“地理标志保护产品”,现栽植面积 5 300 hm² 以上。本文选择紧邻果园村生活区的桃园为研究区(图 1),桃园大致为长方形,面积约 33.35 hm²,每公顷种植桃树约 900 棵。研究区桃园四周以河流包围,桃园内有許多沟道,一条横向主沟道将桃园分为南北两部分,其中在主沟道以北等间距分布 11 条纵沟道,主沟道以南的沟道呈不规则分布。研究区桃园西面和南面也种植桃树,北面 and 东面是居民区,可认为对研究区地表水和地下水的影响主要来自桃园和居民区。桃园采用果农复合经营模式,即在桃树下种植小青菜。每年在桃树结果、桃子上市后(9—11 月)套种青菜,其中 70% 的桃树下套种一茬青菜,30% 的桃树下套种二茬青菜^[12]。这种果农复合经营模式,促进了土壤中氮含量增加,对该区地表水和地下水污染具有重要的影响。

1.2 氮素污染实测数据

研究区定点观测调查从 2009 年 6 月开始,采用 GPS 定位,根据不同的观测项目分别进行观测点布局 and 采样分析。特别地,根据研究区地形和其中分布的渠道河水流向,着重考虑了地表水和地下水观测及采样点布局(图 2),使水体采样点数据尽可能的反映各相关区域土壤径流流失的氮含量。

(1)2009 年 6 月在研究区 16 个采样点采集不同深度(0~15 cm,15~30 cm,30~45 cm)的土样,并采用常规法测定土壤总氮含量,用 Bremner 法分析硝态氮

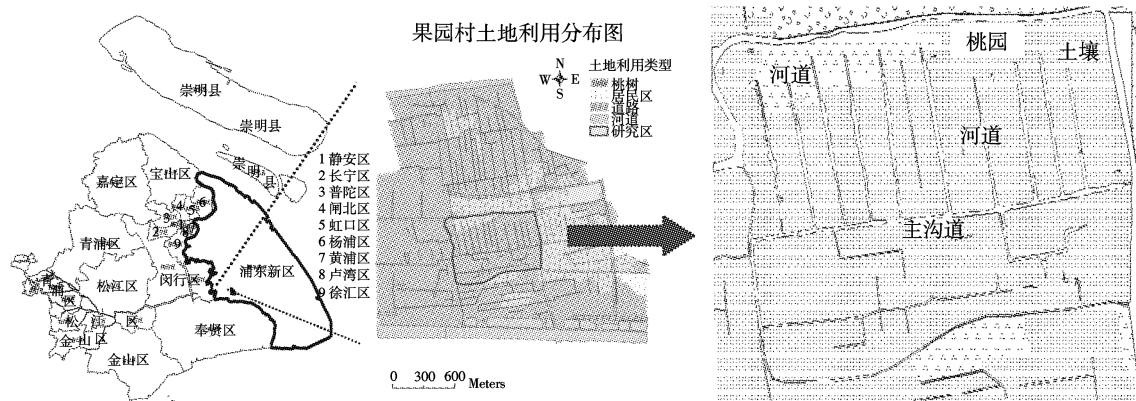


图 1 果园村地理位置及桃园河道分布图

Figure 1 The location of Guoyuan Village & distribution of rivers in peach orchard

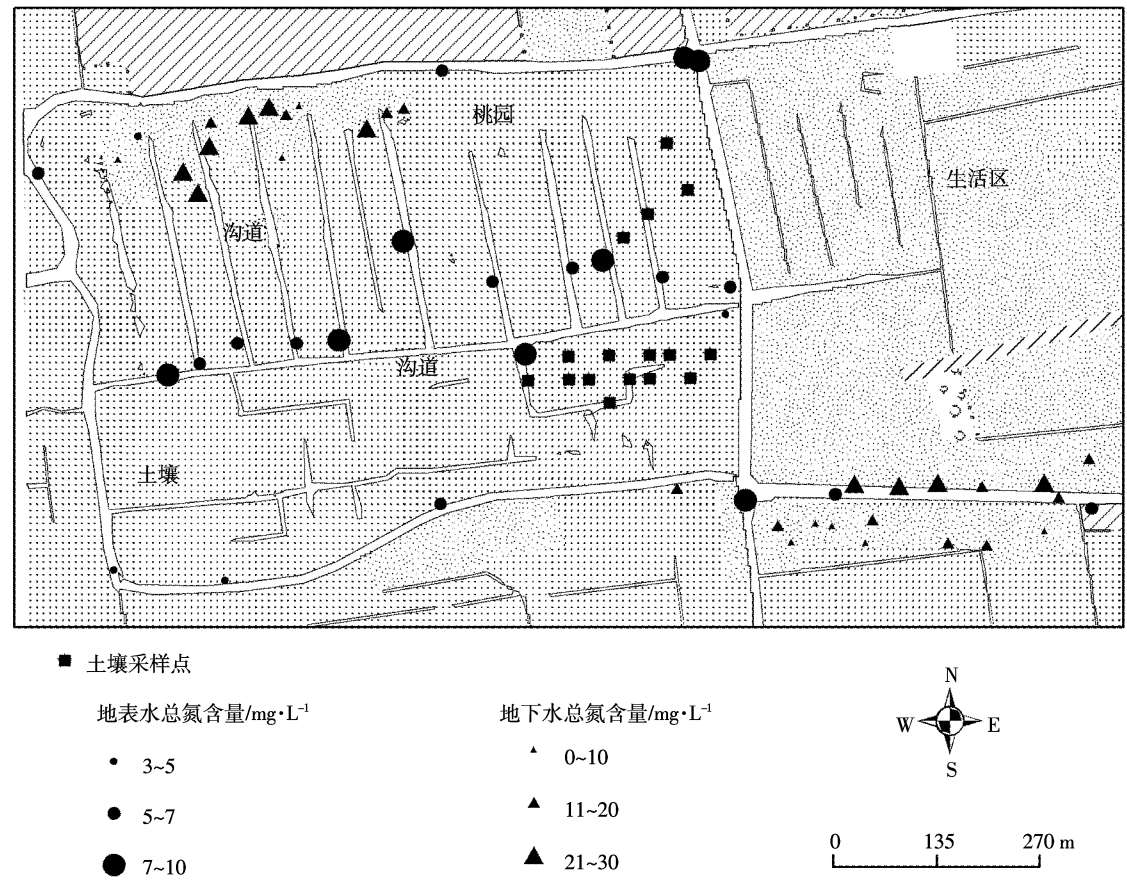


Figure 2 The distribution map of sampling sites

(以 N 计)含量。

(2)2009 年 10 月至 2009 年 12 月和 2010 年 1 月,2010 年 3 月至 2010 年 8 月在研究区 53 个采样点定点观测分析地表水和地下水总氮、硝态氮(以 N 计)含量,其中地表水采样点 25 个,地下水采样点(取样井)28 个。用碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定水中总氮含量,用锌镉还原法测定硝态氮含量。

1.3 田间管理数据及气象数据

农田生态过程氮的循环与作物生长过程和田间管理措施紧密相关。基于模型估算研究区氮循环涉及的各种管理措施数据见表 1,包括桃园近 10 a 的种植方式、施肥量和施肥时间、灌溉量和灌溉时间、耕地时间等,通过实地调查走访当地农技人员获得,部分数据来自文献^[11-12]。

另外,基于水文影响评价模型计算农田径流负荷所涉及的空间数据,比如果园村不同年份土地利用分布图、土壤类型分布图等从果园村村委,结合遥感图像解译获得。研究区气象数据,如近 30 多年以来的气温、降雨数据等从浦东新区气象站获得。

表 1 桃园种植管理措施

Table 1 The management measures of the peach orchard

月份	管理措施
1	施肥(复合肥 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥 $15\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),深翻耕
3	施肥(复合肥 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
5	施肥(复合肥 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),浅翻耕
9—11	套种小青菜
10	灌溉,深翻耕
11	施肥(复合肥 $545\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

注:复合肥的氮含量为 15%;有机肥的有机质含量为25.0%,氮含量为 0.45%。

1.4 研究方法

作为本研究区中的典型区域,桃园是一个相对独立的生态系统,桃树栽培及果农复合经营模式中的农业管理措施直接影响桃园内部及周边土壤-水体氮素非点源污染过程。因此,本研究借助生物地球化学过程模型(DNDC)定量计算分析桃园土壤的氮循环机制,采用非点源污染负荷模型计算分析桃园土壤径流中氮负荷,然后结合定点实测值深入分析桃园生态系统氮的输入输出机制及桃园栽培和果农复合模式对

其周边地表和地下水非点源污染的影响。

1.4.1 生物地球化学过程模型

DNDC 是一个模拟和估算农业生态系统中碳(C)和氮(N)生物地球化学循环的机理模型^[13-16]。尽管 DNDC 最初是依据美国的环境条件建立的,但近几年该模型已经在美国、加拿大、英国、印度、欧盟国家、中国、澳大利亚和新西兰等国家运用,在不同的农业生态系统比如草地、农田以及森林生态系统中获得了验证。DNDC 既是点位模型,也能估算区域的排放,被国际生态环境学界认为是当前最好的生物地球化学过程模型之一^[17]。用 DNDC 模拟农田任一点位的生物地球化学过程时,需要该点位的气象、土壤、植被和管理等相关参数支持,具体参数见表 2。

借助 DNDC 模型可模拟在一定生产管理方式下,C 和 N 生物地球化学循环过程,并了解土壤氮素污染状况及此过程中氮通量变化,进而分析不同的管理措施,比如施肥与翻耕方式对桃园土壤 C 和 N 含量的影响^[21],为进一步定量分析农田径流中氮负荷量提供依据。

1.4.2 非点源污染负荷模型

农田径流是量化和模拟农业非点源污染的关键因素。土壤氮磷随地表径流流失是一个缓慢而复杂的过程,径流中污染物的输出浓度和单位面积负荷量均与区域气象气候条件有关^[22]。长期水文影响评价模型(L-THIA)与 GIS 结合,根据气候数据、土地利用类型和土壤类型,可计算年均径流量和非点源污染负荷^[23]。

本研究中研究区桃园西面和南面也种植桃树,北面和东面是居民区。桃园四周河流包围,桃园内有許多沟渠。调查和实测数据表明,土壤中氮肥在降雨和灌溉的作用下,随着地表径流流失到河道,造成水体不同程度的富营养化,地表水和地下水都有不同程度的氮素污染。基于 L-THIA 模型模拟桃园氮素的输出过程,可获得基于区域气象条件下桃园径流中氮素的含量,结合 DNDC 模型计算的桃园氮素输入迁移规律,特别是与定点实测数据的分析比对,可进行桃园氮素非点源污染特征分析和定量研究,在现行田间管理措施和气象条件下,分析土壤-水体氮素流失污染机制以及研究区地表水和地下水氮素污染状况。

2 结果与讨论

2.1 桃园水体氮污染状况

桃园水体总氮、硝态氮含量如图 3。总体上看,地表水与地下水氮素含量差异很大,地下水氮素含量约高出地表水氮素含量 1~2 倍。地表水氮素含量的标准差明显小于地下水的标准差,说明地表水各采样点的氮素含量变化不大。但在 2010 年 5 月地表水总氮含量明显高于其他时间段的总氮含量,原因可能为 5 月份施肥量大,且采样当天(22 日)降雨量达到 45.5 mm,所以地表水中总氮均值高达 14.57 mg·L⁻¹。地下水的氮素含量变化则十分明显:总氮含量最小值为 0.24 mg·L⁻¹,最大值为 49.23 mg·L⁻¹;硝态氮含量最小值为 0.18 mg·L⁻¹,最大值为 45.41 mg·L⁻¹。

表 2 DNDC 模型输入参数及部分数值
Table 2 The input parameters in DNDC model

	参数	数值	来源
气象信息	温度及降雨量	每日数据(略)	浦东新区气象站
	雨水中含氮量/mg N·L ⁻¹	2.53	文献[4]
	大气中 NH ₃ /μg N·m ⁻³	90	当地农技中心
	CO ₂ 含量/10 ⁻⁶	350	当地农技中心
土壤本底信息	容重/g·cm ⁻³	1.33	文献[18]
	质地	黏土	当地农技中心
	土壤有机碳(SOC)/kg C·kg ⁻¹	0.022	文献[19]
	酸碱度(pH)	6.80	当地农技中心
作物信息	作物名称	桃树、小青菜	实地调查
	轮作机制	套作	实地调查
	生长参数	各器官(略)	当地农技中心
农田管理信息	翻耕次数	每年 3 次	文献[20]
	施肥量/kg N·hm ⁻² ·a ⁻¹	复合肥 374;有机肥 150.62	文献[11]
	灌溉次数	每年 2 次	文献[20]
	秸秆还田比例	桃树/100%,小青菜/0%	实地调查

进一步分析桃园水体氮素空间变化特征,结合图2可知,桃园周围河道的地表水氮素含量相对较低,桃园主沟道的地表水氮素含量较高,由此推测应该是桃园内施肥所致。地下水中氮素含量分布特征是居民区旁较低,果园旁较高,这些特征正是农业生产过程导致的氮素非点源污染的直接反映。

据我国地表水环境质量标准(GB 3838—2002),(以总氮计),桃园地表水总氮含量各月均值达 $6.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水质远劣于地表水 V 类标准 ($\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),根据我国现行的“一票否决制”的水质评价方法^[24],该区地表水劣于 V 类,污染严重。桃园地下水总氮各月均值为 $16.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,劣于地表水 V 类标准 ($\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),据我国地下水环境质量标准(GB/T 14848—1993),(以硝态氮计),地下水硝态氮各月均值为 $15.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,属于地下水 III 类 ($\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。不过,20%采样点的硝态氮含量符合地下水 V 类水标准 ($>30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。因此,可以认为该区地下水水质属于地下水 V 类,且远

劣地表水 V 类标准,污染严重。这与黄红艳^[11]的结论一致。

2.2 桃园氮素非点源污染特征

由上面分析可知,桃园旁较其他区域的地下水氮素污染严重。基于研究区桃园的生产和管理措施,运用 DNDC 模型模拟其 C、N 循环。基于近 3 a 桃园生产管理信息,借助 DNDC 模拟计算可知,本研究中氮素输入来源主要包括有机肥、化肥、降雨中氮沉降、氨沉降 4 种途径,总计 $581.42 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;氮素输出途径包括作物吸收和 NH_3 、 N_2O 、 NO 、 N_2 等气体的排放,总计 $288.07 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由此可推算出研究区桃园土壤中氮通量变化及可供地表径流和土壤淋溶的氮量为 $293.35 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。DNDC 模拟显示,研究区土壤 50 cm 剖面总氮平均含量为 $1868.27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;2010 年 6 月土壤氮含量实测结果为 $1728.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,拟合度达 92.53%。由此表明,DNDC 对研究区桃园 C、N 循环的过程模拟具有较高的可信度和重要的

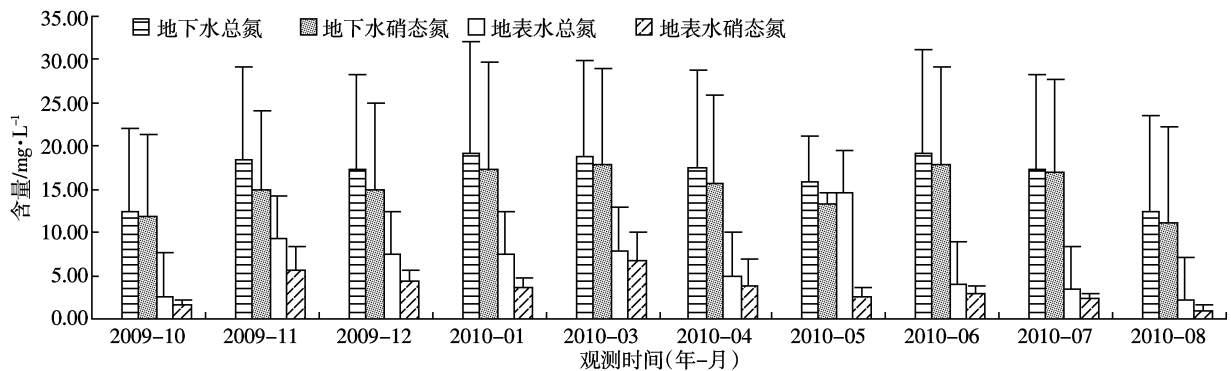


图3 桃园水体氮素含量状况

Figure 3 Nitrogen content in water of the peach orchard

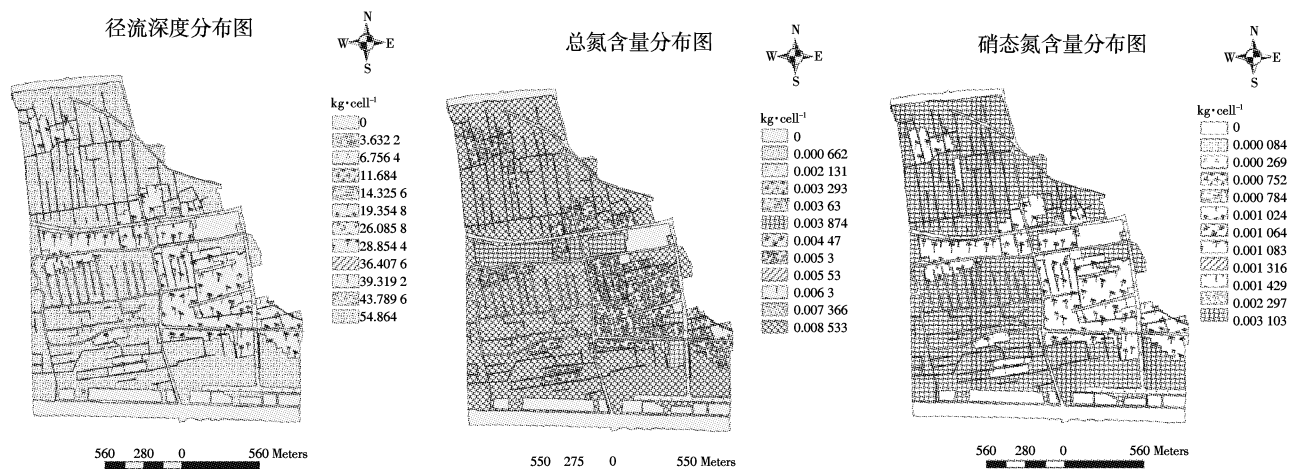


图4 果园村径流深度、总氮和硝态氮负荷模拟分布图

Figure 4 The distribution maps of runoff depth, TN & $\text{NO}_3\text{-N}$ simulated by L-THIA

参考价值。

基于 L-THIA 模型计算得到果园村径流深度、总氮和硝态氮负荷模拟分布(图 4),模拟显示果园村桃园年均径流量为 190 mm。由图 4 可以看出,相比其他用地类型,桃园土壤氮素的污染输出最大,总氮输出为 $0.0085 \text{ kg} \cdot \text{cell}^{-1}$ (每 cell 为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$),即 $9.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硝态氮输出为 $0.0031 \text{ kg} \cdot \text{cell}^{-1}$,即 $3.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

L-THIA 模型估测值表示区域长期氮素平均输出量,体现的是氮素平均污染水平,而地表水总氮实测值是在作物的某个生长期、在一定的农田管理措施和气候条件下测定的。比较分析实测值与 L-THIA 模型模拟结果表明,桃园径流中总氮含量(模拟计算获得)占地表水总氮含量(实测值)的 78.08%,硝态氮是 52.28%。由此可推测,除土壤外,可能另有氮素污染源进入地表水中,具体污染源有待进一步调查。另外,研究区桃园采用果农复合经营模式,促进了土壤中氮含量增加,但 L-THIA 模型模拟时没有考虑该复合种植方式,这可能会影响模拟结果,导致模拟值偏小。

根据相关文献得知^[25],长江三角洲地区土壤氮素含量高,水量丰富,为氮素非点源重度污染区。上海地处长江三角洲地区,研究区年平均降水 1 100 mm,且集中在 7—9 月,依据硝态氮在土壤中迁移规律:每 2~3 mm 降水可使硝态氮下移 1 cm^[25],桃园土壤中净增加的氮含量会不同程度地下移 330~550 cm。本研究地下水实测值正是取自深 4 m 的井水,这可能是造成研究区地下水氮素含量较高的主要原因之一。进一步,以氮素经土壤渗漏和径流流失占输入量的 11%计^[26],综合 DNDC 和 L-THIA 模型的模拟分析,土壤径流中地表水氮素含量占氮输入量的 1.7%。实测表明,地下水氮素含量占氮输入量的 5.8%,那么土壤渗漏过程中氮含量应该占氮输入量的 3.5%,也就是说,约有 $20.35 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 累积渗漏导致桃园地下水氮素含量高及至污染。

3 结论

本文结合定点实测分析数据,借助 DNDC 地球化学过程模型和长期水文影响评价模型 L-THIA,定量分析了研究区地表水和地下水氮污染状况。观测分析数据表明,地表水、地下水污染水平都很高,地表水氮含量远劣于地表水 V 类标准,但其氮素含量在空间上差异不大。地下水氮素含量变化范围大,远劣于地表水 V 类标准,且其硝态氮含量属于地下水 V 类。

研究区桃园农业生产活动中施用的肥料是该区

地表水地下水的主要污染源。特别是对于氮素含量变化较大的桃园地下水,农业生产过程中氮素的迁移输出规律与其非点源污染直接相关。根据 DNDC 和 L-THIA 模型综合模拟及实测值分析比较,桃园土壤中氮通量变化及可供地表径流和土壤淋溶的氮量为 $293.35 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (DNDC 模型模拟),其中 1.7%通过地表径流进入水中(L-THIA 模型模拟),进入地下水的氮占 5.8% (实测),推断分析土壤渗漏过程中的氮占 3.5% (包括研究区与周边环境的非点源污染渗漏部分)。

需要说明的是,本研究区周边是同样农业生态环境的桃园和居民区,由河流将其与周边环境隔开,只是一个相对独立的区域。本研究借助模型、结合根据实际情况布局的观测点实测值,探讨了以研究区为例的桃园农业生态系统中氮的非点源污染特征,难以绝对划分的边界和农业土壤、水环境的复杂性可能会影响研究结果的精度,但研究区及周边同样的农业生态系统也决定了本研究结果可能反映此类农业环境中氮的非点源污染状况,特别是根据模拟值、实测值,推断分析获得的土壤渗漏过程中的氮含量,本身就包括了可能的边界模糊产生的非点源污染部分。另外,随降雨强度和历时不同的土壤渗漏也是造成地下水污染的主要原因,而根源还是桃园施用的肥料。因此,桃园施肥措施的改善是减少水环境氮素污染的有效手段,可通过调整施肥结构,调整复合肥和有机肥的搭配比例,以及肥料中氮、磷、钾所占的比例,从而控制和稳定氮肥施用量。

参考文献:

- [1] 丁晓雯,李薇,陈庆伟.农业非点源污染模型研究现状与发展趋势[J].现代农业科技,2008(14):261-263.
DING Xiao-wen, LI Wei, CHEN Qing-wei. The study status and development trend of agricultural non-point source pollution model[J]. *Modern Agriculture Technology*, 2008(14):261-263.
- [2] Boers P C M. Nutrient emissions from a culture in Netherlands: causes and remedies[J]. *Water Sci Technol*, 1996,33:183-190.
- [3] Tim U S, R Jolly. Evaluating agriculture non-point source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model[J]. *Environ Qual*, 1994,23(1):25-35.
- [4] 张大弟,张晓红,戴育民.上海市郊 4 种地表径流污染负荷调查与评价[J].上海环境科学,1997,16(9):7-11.
ZHANG Da-di, ZHANG Xiao-hong, DAI Yu-min. Investigation and assessment of pollution load on four surface runoffs in Shanghai suburbs[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1997,16(9):7-11.
- [5] 阮仁良.苏州河截流区外非点源污染调查[J].上海环境科学,1997,16(1):20-22.
RUAN Ren-liang. Investigation of non-point pollution source outside the sewerage interception area of Suzhou Creek[J]. *Shanghai Environ-*

- mental Science, 1997, 16(1):20-22.
- [6] 李定强,王继增,万洪富,等.广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J].土壤侵蚀与水土保持通报,1998,4(3):12-18.
LI Ding-qiang, WANG Ji-zeng, WAN Hong-fu, et al. Law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Dongjiang Drainage Basin of Guangdong Province[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3):12-18.
- [7] 郑建瑜,周乃晟.农田氮素非点源污染模型及年负荷估算研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2007(6):12-19.
ZHENG Jian-yu, ZHOU Nai-xing. Research on nitrogen non-point source pollution model in farmland of Shanghai suburbs[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2007(6):12-19.
- [8] 苏保林,王建平,贾海峰,等.密云水库流域非点源污染识别[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(3):360-365.
SU Bao-lin, WANG Jian-ping, JIA Hai-feng, et al. Identification of non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2006, 46(3):360-365.
- [9] 李恒鹏,刘晓玫,黄文钰.太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J].地理学报,2004,59(3):401-408.
LI Heng-peng, LIU Xiao-mei, HUANG Wen-yu. West Zhejiang Taihu Lake Basin area of different land types of non-point source pollution output[J]. *Journal of Geographica Sinica*, 2004, 59(3):401-408.
- [10] 李俊然,陈利顶,傅伯杰,等.于桥水库流域地表水非点源N时空变化特征[J].地理科学,2002,22:238-242.
LI Jun-ran, CHEN Li-ding, FU Bo-jie, et al. N non-point sources of surface water spatial and temporal variation of Yu Bridge Reservoir[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22:238-242.
- [11] 黄红艳,高扬,曹洁君,等.上海市都市农业区域地下水磷素非点源污染特征研究[J].水土保持学报,2010,24(1):101-105.
HUANG Hong-yan, GAO Yang, CAO Jie-jun, et al. Characteristics of phosphorus non-point source pollution on groundwater in urban agricultural region of Shanghai[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):101-105.
- [12] 火建福,汪杰,虞木奎.果农复合经营模式效益分析——以上海市果园村桃树-青菜复合模式为例[J].农业科技情报,2009,41(4):12-13.
HUO Jian-fu, WANG Jie, YU Mu-kui. Benefit analysis of fruit:Crops compound management model:Take peach-brassica chinensis compound model in Shanghai city Nanhui area as example[J]. *Agricultural Science and Technology Information*, 2009, 41(4):12-13.
- [13] 李长生.土壤碳储量减少:中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J].第四纪研究,2000,20(4):345-350.
LI Chang-sheng. Reduction of soil carbon storage: The hidden agriculture of China: The comparative study on agricultural ecosystem carbon cycle in China and U.S.[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4):345-350.
- [14] 杨学明.利用农业土壤固定有机碳——缓解全球变暖与提高土壤生产力[J].土壤与环境,2000,9(4):311-315.
YANG Xue-min. Carbon sequestration in farming land soils: an approach to buffer the global warming and to improve soil productivity[J]. *Soil and Environmental Science*, 2000, 9(4):311-315.
- [15] 杨学明,张晓平,方华军,等.用RothC 26.3模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J].中国农业科学,2003,36(11):1318-1324.
YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, FANG Hua-jun, et al. RothC-26.3 model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of Corn in Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11):1318-1324.
- [16] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long term experiments[J]. *Geoderma*, 1997, 81:153-225.
- [17] Donna L Giltrap, Changsheng Li, Surinder Saggarr. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136:292-300.
- [18] 钱非凡,李伯才,等.上海市奉贤区耕地地力调查与质量评价[M].上海:上海科学技术出版社,2006,45.
Qian Fei-fan, Li Bo-cai, et al. The investigation of soil productivity and quality evaluation in Fengxian District of Shanghai[M]. Shanghai: The press of Science and Technology of Shanghai, 2006, 45.
- [19] 中国农业科学院农业自然资源和农业区划研究所,全国土壤肥料总站.中国耕地资源及其开发利用[M].北京:测绘出版社,1992,207.
The institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Institute of Natural Resources and Agriculture Division, National Soil and Fertilizer Station. China's cultivated land resources and its development[M]. Beijing: The press of surveying and mapping, 1992, 207.
- [20] 庄恩及,桃艺新探[M].北京:中国农业出版社,1992,230.
Zhuang En-ji. New research of peach planting[M]. Beijing: The press of science and technology in Chinese agriculture, 1992, 230.
- [21] 王立刚,邱建军,马永良,等.应用DNDC模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J].中国农业大学学报,2004,9(6):15-19.
WANG Li-gang, QIU Jian-jun, MA Yong-liang, et al. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(6):15-19.
- [22] 贝荣塔,周跃,何敏.土壤中氮磷和滇池水体污染的潜在关系[J].西北林学院学报,2010,25(2):30-34.
BEI Rong-ta, ZHOU Yue, HE Min. Potential relationship between soil nitrogen & phosphorus content and water pollution in Dianchi Lake[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(2):30-34.
- [23] 沈涛,刘良云,马金峰,等.基于L-THIA模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征[J].农业工程学报,2007,23(5):62-68.
SHEN Tao, LIU Liang-yun, MA Jin-feng, et al. Spatial distribution characteristics of non-point pollution of Miyun reservoir areas based on L-THIA model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5):62-68.
- [24] 唐克旺,朱党生,唐蕴,等.中国城市地下水饮用水源地水质状况评价[J].水资源保护,2009,25(1):1-4.
TANG Ke-wang, ZHU Dang-sheng, TANG Yun, et al. Groundwater quality assessment of urban drinking water sources in China[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(1):1-4.
- [25] 侯彦林,李红英,赵慧明.中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证:IV各类型区污染程度和趋势[J].农业环境科学学报,2009,28(7):1341-1345.
HOU Yan-lin, LI Hong-ying, ZHAO Hui-ming. China N non-point source pollution of farmland and empirical estimation: IV various types of pollution levels and trends[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1341-1345.
- [26] 龚宗浩.南汇区土壤污染状况及治理对策[J].上海农业科技,2003(2):12.
GONG Zong-hao. Soil pollution countermeasure in Nanhui district[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2003(2):12.