

刘白杨, 尹黎明, 刘新亮, 等. 金井流域景观格局对地下水硝态氮时空分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 753–760.

LIU Bai-yang, YIN Li-ming, LIU Xin-liang, et al. Landscape effects on temporal and spatial pattern of groundwater nitrate concentrations in the Jinjing catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 753–760.

金井流域景观格局对地下水硝态氮时空分布的影响

刘白杨^{1,2}, 尹黎明³, 刘新亮^{2*}, 李巧云^{1*}, 王毅², 李勇², 吴金水²

(1.湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410125; 2.中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3.湖南省水利水电科学研究院, 长沙 410011)

摘要:以湖南省长沙县的金井流域为例, 于2013—2014年春夏秋冬四季随机采集流域内120口饮用水井水体样品, 研究景观格局对地下水硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)浓度的影响。研究结果表明:金井流域地下水存在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度超过世界卫生组织饮用水标准($>10\text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$)样品数占总样品数的4.9%~17.5%, 且夏季和冬季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度超过世界卫生组织饮用水标准的频率高于春季和秋季;地下水文系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的输移使得流域地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现明显的空间自相关性, 采用Moran's I全局指数评价方法的分析结果表明, 夏季和秋季的空间自相关性较强(0.254~0.277), 而冬季和春季的空间自相关性较弱(0.152~0.170);采样空间滞后模型对地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度与土地利用景观格局指数的拟合结果表明, 地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度与农田、林地、居民地的面积比例显著相关($P<0.05$), 且模型模拟的决定系数随季节和距离水井半径不同而变化。

关键词:氮素; 土地利用方式; 面源污染; 流域环境; 生态水文过程

中图分类号: X523 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)04-0753-08 doi:10.11654/jaes.2016-1428

Landscape effects on temporal and spatial pattern of groundwater nitrate concentrations in the Jinjing catchment

LIU Bai-yang^{1,2}, YIN Li-ming³, LIU Xin-liang^{2*}, LI Qiao-yun^{1*}, WANG Yi², LI Yong², WU Jin-shui²

(1.College of Biological Science & Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410125, China; 2.Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring and Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3.Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha 410011, China)

Abstract: Groundwater samples were randomly collected from 120 wells in the selected Jinjing River catchment, Changsha County, Hunan Province, in the spring, summer, autumn, and winter of 2013—2014, to determine landscape pattern effects on groundwater nitrate concentrations ($\text{NO}_3\text{-N}$) using the Moran's I index and spatial lag regression analysis. The results suggested that: groundwater $\text{NO}_3\text{-N}$ pollution occurred in the catchment, with 4.9%~17.5% samples exceeding the WHO drinking water standards ($>10\text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$), and particularly higher pollution frequencies in summer and winter than those in spring and autumn seasons; groundwater $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations showed obvious spatial auto-correlation mainly due to the $\text{NO}_3\text{-N}$ transport through groundwater flow, and the Moran's global indices were greater in summer and autumn (0.254~0.277) than in spring and winter (0.152~0.170) at the catchment scale; groundwater $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations significantly related to the areal proportion of agriculture, forest, and residential area when fitted by the spatial lag regression model ($P<0.05$), and their determine coefficients of fitting strongly varied with seasons and the radius from the wells. Therefore, the results could provide technical basis for reasonable landscape planning to protect the groundwater environment and drinking water safety in subtropical hilly agricultural catchments.

Keywords: nitrogen; land use type; non-point source pollution; catchment environment; eco-hydrological process

收稿日期: 2016-11-10

作者简介: 刘白杨(1991—), 女, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学方面的研究。E-mail: 329650266@qq.com

* 通信作者: 李巧云 E-mail: 1065596897@qq.com; 刘新亮 E-mail: 814708901@qq.com

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAD14B01, 2014BAD14B05); 湖南省科协决策咨询研究计划课题

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014BAD14B01, 2014BAD14B05); The Decision and Consulting Research Project of the Hunan Provincial Association for Science and Technology

近年来,人类对土地的不合理利用在世界范围内引发了一系列地下水污染问题。硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)是常见的农业流域地下水污染物,对自然生态系统和人类健康有严重危害。研究表明,地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染不仅会加剧以地下水补给为主的河流、湖泊等地表水的富营养化,长期饮用高 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度地下水还会造成人体铁血红蛋白血症、胃癌和非霍奇金淋巴瘤,并且会诱发各种消化道病症^[1-2]。流域景观格局的改变和人类活动的影响是造成地下水污染的主要原因^[3]。土地利用方式变化会改变原有地表覆盖状况及土壤理化性质等,从而使得地表和土壤中氮素物质大量迁移进入地下水文循环系统,加剧地下水污染^[4-5]。人类活动,特别是生活污水和工业废水的排放、化学肥料和农药的施用,决定着地下水文系统的氮素输入数量和形态,从而对地下水环境造成明显的影响^[6]。南方亚热带丘陵区是我国主要粮食产区和生态功能区,区域内地下水埋藏浅,地下水常常是当地农村群众的直接饮用水源,不合理的景观布局和高强度的农业发展使得该区域正饱受地下引用水源 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染之痛^[7]。

国内外学者已对流域地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染与景观格局的关系进行了大量研究,但这种关系对流域地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染物空间分布的规律仍缺乏深入研究^[8],严重制约了我国农业流域景观规划和地下水资源保护工作的推进。孙才志等^[9]以辽河平原为研究区,通过采用 Moran's I 量化地下水污染的空间结构,结果表明 1991—2010 年间研究区地下水污染表现为较强的自相关现象,且关联程度呈略下降趋势。虽然目前有采用地统计分析和空间滞后模型分析地下水水质空间分布特征的研究,但鲜有系统分析地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染成因及影响因素的报道^[10]。流域景观生态系统地下水文过程及其氮磷输入、富集、迁移、输出过程都具有季节性。譬如,地下水文过程敏感期主要发生于降雨和灌溉集中期,农田生态系统氮磷输入主要发生于作物施肥期。已有的运用空间统计方法对地下水环境的研究往往只注重污染物分布的空间分布规律性,而忽视空间分布规律的季节性^[11],这就制约了我们在实践过程中运用合理生态景观规划方法保护地下水环境。因此,本文选取湖南省长沙县金井流域为研究对象,运用空间统计方法研究地下水污染的空间分布规律以及不同土地利用方式对地下水污染强度的影响。本研究可为亚热带丘陵区农业流域景观格局的合理规划和居民地下饮用水的安全保障提供理论基础和技术依据。

1 材料和方法

1.1 流域特征

本研究选取湖南省长沙县中国科学院长沙农业环境观测研究站内的金井流域($27^{\circ}55'\sim 28^{\circ}40'\text{N}$, $112^{\circ}56'\sim 113^{\circ}30'\text{E}$, 海拔 46~452 m)作为研究对象。金井河流域总面积 105 km^2 (图 1a、图 1b),属湘江一级支流捞刀河水系上游。区域内年均降雨量 1422 mm,降雨集中在每年 4—10 月,年平均蒸发量 1272 mm,年平均气温 17.2 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 274 d,年日照时数 1663 h,属典型的亚热带湿润季风气候。金井流域属典型低山丘陵地貌,整个流域地势总体西北高、东南低。流域内水系起源于西北部山谷,流经水田、居民地、沟渠,最后汇入金井河内。土壤为花岗岩发育而来的红壤。土地利用方式主要以林地、水田为主,林地多分布于山顶和陡坡上,水田主要分布在河谷、河漫滩等低洼平缓地带。林地主要是次生马尾松林(*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)和油茶(*Camellia oleifera* Abel.)等人工林^[12]。农田占流域总面积的 29%,多为双季稻田。早稻一般在 4 月底插秧,7 月中旬收获,之后紧接着种植晚稻,于 10 月中旬收获。稻田肥料施用量为 374 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 66 $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

1.2 地下水采样与分析

在 2013—2014 年间的春(2013 年 4 月)、夏(2013 年 7 月)、秋(2013 年 11 月)、冬(2014 年 1 月)四个季节随机对金井流域内 120 口农户饮用水井进行采样。采样时各水井水位不一致,在流域地势较高的西北部山林区,井水水位较深;地势较低洼的东南部农田区,井水水位较浅。采集水样时,统一采集水井水面下 0.2 m 处样品,用采样瓶分装,并记录水井地理坐标,立即送往实验室进行分析。水样经离心后,取上清液直接采用流动分析仪(Bran, Luebbe/Technicon, GER)测定 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度。

1.3 土地利用方式

金井流域土地利用方式图来自湖南省测绘学信息中心(图 1b),整个流域土地利用方式分为林地、农田、居民地、水体(包括大型的排水灌溉渠、河流和水库等)和其他。为准确识别较小的土地类型斑块(如小型水体),将土地利用方式矢量图转换为空间分辨率为 5 m 的栅格数据,再用 ArcGIS™ 10.0(ESRI, Redlands, CA, USA)对各土地利用方式类型进行统计。金井流域人口分布比较集中,居民区相邻间水井平均

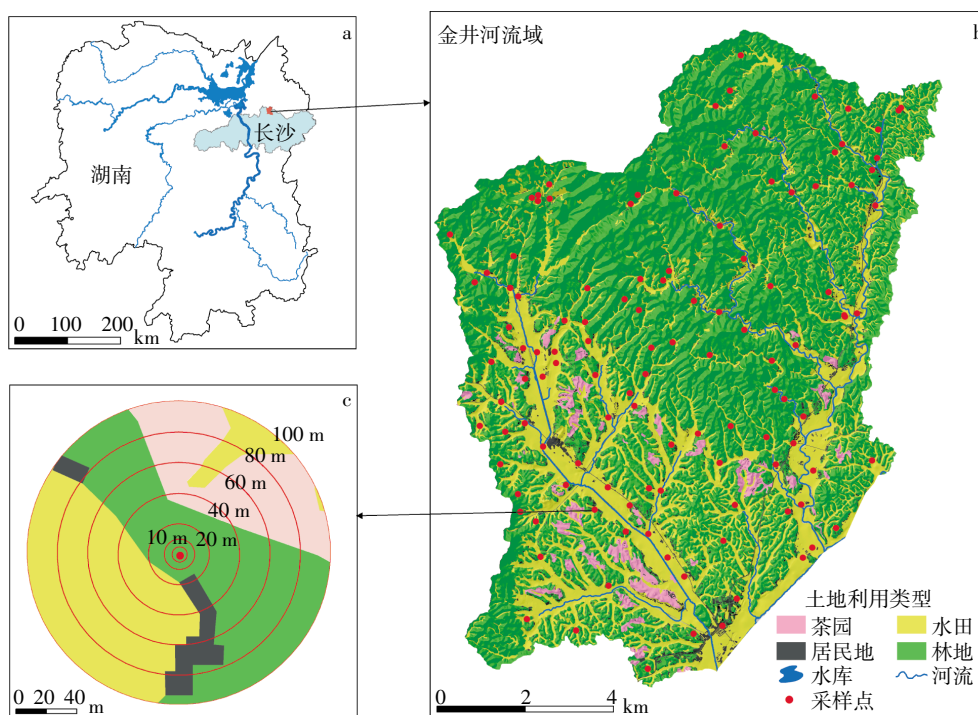


图 1 金井流域土地利用方式、采样点及其周边阶梯缓冲区分布图

Figure 1 Jinjing catchment land use map, sampling spatial distributions and its surrounding gradient buffer zones

距离约 100 m。因此在统计分析土地利用方式时,分别以水井为圆心,以 5、10、20、40、60、80、100 m 为半径,计算圆形区域内土地利用方式组成(图 1c),包括居民地、农田、林地、其他土地利用方式四大类型。

1.4 数据处理

流域内景观斑块的空间分布并非离散和独立的,而是具有一定的空间自相关性,不同景观斑块之间的相互依赖性和联结性可能会影响对流域内地下水 NO_3^- -N 浓度的空间分布规律分析。Moran's I 全局指数是常用的量化空间自相关性指标,可以衡量不同位置水井地下水 NO_3^- -N 浓度在同流域内的相互依赖程度。金井流域地下水 NO_3^- -N 分布的 Moran's I 全局指数采用空间计量软件 GeoDaTM1.8 计算^[13],公式如下:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \cdot \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中: N 为样品数; X 为 NO_3^- -N 浓度, $\text{mg N} \cdot \text{L}^{-1}$; i, j 为随机的两个不同水井; $\bar{X}$ 为流域内 NO_3^- -N 浓度的均值, $\text{mg N} \cdot \text{L}^{-1}$; w_{ij} 为空间权重矩阵元素。

Moran's I > 0 表示空间正相关性,数值越大,空间自相关性越明显; Moran's I < 0 表示空间负相关性。

采用 Moran's I 全局指数计算结果表明,流域内水井地下水 NO_3^- -N 浓度存在较强的空间自相关性,

因而空间滞后模型要比传统的最小方差回归模型能更准确地判断土地利用方式与地下水 NO_3^- -N 浓度的相关关系。由于居民地、农田、林地是水井周围最常见的土地利用方式,也是地下水系统外源性氮输入的主要来源,本研究采用 GeoDaTM1.8 软件计算了距离水井 7 个半径范围(图 1c)内居民地、林地、农田面积比例与地下水 NO_3^- -N 浓度的模型模拟决定系数。空间滞后模型又称为空间自回归模型,在传统的最小二乘法回归基础上融入空间权重项,从而提高模拟精度。空间滞后模型计算公式如下:

$$Y = \alpha + \beta X + \gamma W + \varepsilon \quad (2)$$

式中: Y 为地下水 NO_3^- -N 浓度, $\text{mg N} \cdot \text{L}^{-1}$; X 为各土地利用方式的面积比例, %; α 为模型常数; β 为土地利用方式的系数; γ 为空间自回归系数; W 为地下水 NO_3^- -N 浓度的空间矩阵; ε 是模型残差数值。

在模型拟合过程中,采用拉格朗日乘子(Lagrange multiplier tests, LM)方法检测各土地利用方式面积比例与地下水 NO_3^- -N 浓度的相关程度。当 $P > 0.05$ 时,相关性不显著;当 $P < 0.05$ 时,相关性显著。

2 结果与分析

流域内饮用水井周围土地利用方式以居民地(8.6%~30.6%)、水田(35.6%~40.8%)和林地(33.0%~

47.94%)为主(表 1),其他土地利用方式(0.8%~2.7%)只占极小的一部分。各土地利用方式组成随距离水井半径的不同而变化,其中水田和林地面积比例随着水井距离半径增加而增加,而居民地面积比例随着水井距离半径增加而减小。

金井流域地下水 NO₃-N 浓度的分析结果见图 2。从季节来看,冬春季节(1 月和 4 月)NO₃-N 平均浓度要高于夏秋季节(7 月和 11 月),且相差明显(0.71 mg N·L⁻¹ 和 0.63 mg N·L⁻¹);从空间来看,流域西南部农业集中地区地下水 NO₃-N 浓度要高于东北部山林区。

频率分析结果表明金井流域地下水存在污染(图 3),NO₃-N 浓度超过世界卫生组织饮用水标准(>10 mg N·L⁻¹)的样品数占总样品数的 4.9%~17.5%。虽然 NO₃-N 浓度在各浓度区间的分布规律具有一致性,都主要分布在 0.2~1.0 mg N·L⁻¹ 和 2.0~10.0 mg N·L⁻¹ 范围内,但是各浓度区间的频率分布仍然存在一定的季节性波动。譬如,NO₃-N 浓度> 10 mg N·L⁻¹ 的分布频率在夏季(7 月)和冬季(1 月)较高(12.4%~17.5%),而 NO₃-N 浓度<0.2 mg N·L⁻¹ 在秋季较高。

Moran's I 全局指数计算结果表明,流域地下水 NO₃-N 浓度存在明显的空间自相关性(表 2)。一般而言,Moran's I >0 表示空间正相关性,数值越大,空间自相关性越明显。比较 4 个不同季节的 Moran's I 全局指数,夏季和秋季的空间自相关性较强,而冬春季节的空间自相关性较弱。

采样空间滞后模型拟合结果表明(图 4),除居民地冬季外,3 种土地利用方式在不同季节期间都与地下水浓度显著相关($P<0.05$),但是量化相关性的决定系数随水井距离半径和季节性的改变而变化。春季和

表 1 距离采样水井不同半径范围内土地利用组成(%)

Table 1 Land use composition in the different diameters from the sampled wells(%)

土地利用类型	半径/m						
	5	10	20	40	60	80	100
居民地	30.6	28.8	24.3	17.0	12.6	10.1	8.6
农田	35.6	36.3	37.5	38.8	40.5	40.8	40.8
林地	33.0	33.8	36.8	41.7	45.0	47.1	47.9
其他	0.8	1.0	1.4	2.5	1.9	2.1	2.7

表 2 流域地下水 NO₃-N 浓度的 Moran's I 全局指数

Table 2 Moran'I indices of groundwater NO₃-N concentrations in the catchment

空间自相关性	春季(4 月)	夏季(7 月)	秋季(11 月)	冬季(1 月)
Moran'I 全局指数	0.152	0.277	0.254	0.170

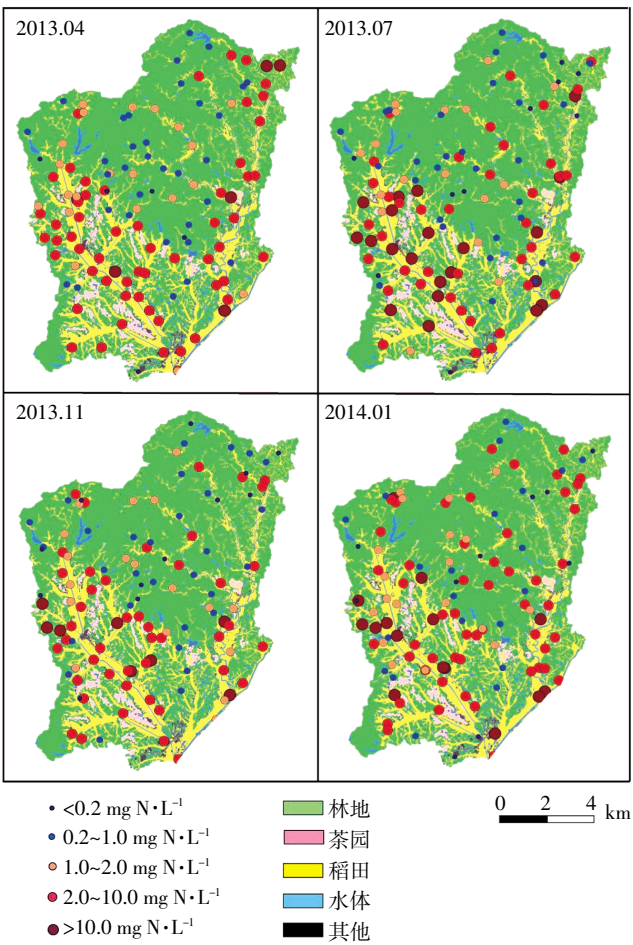


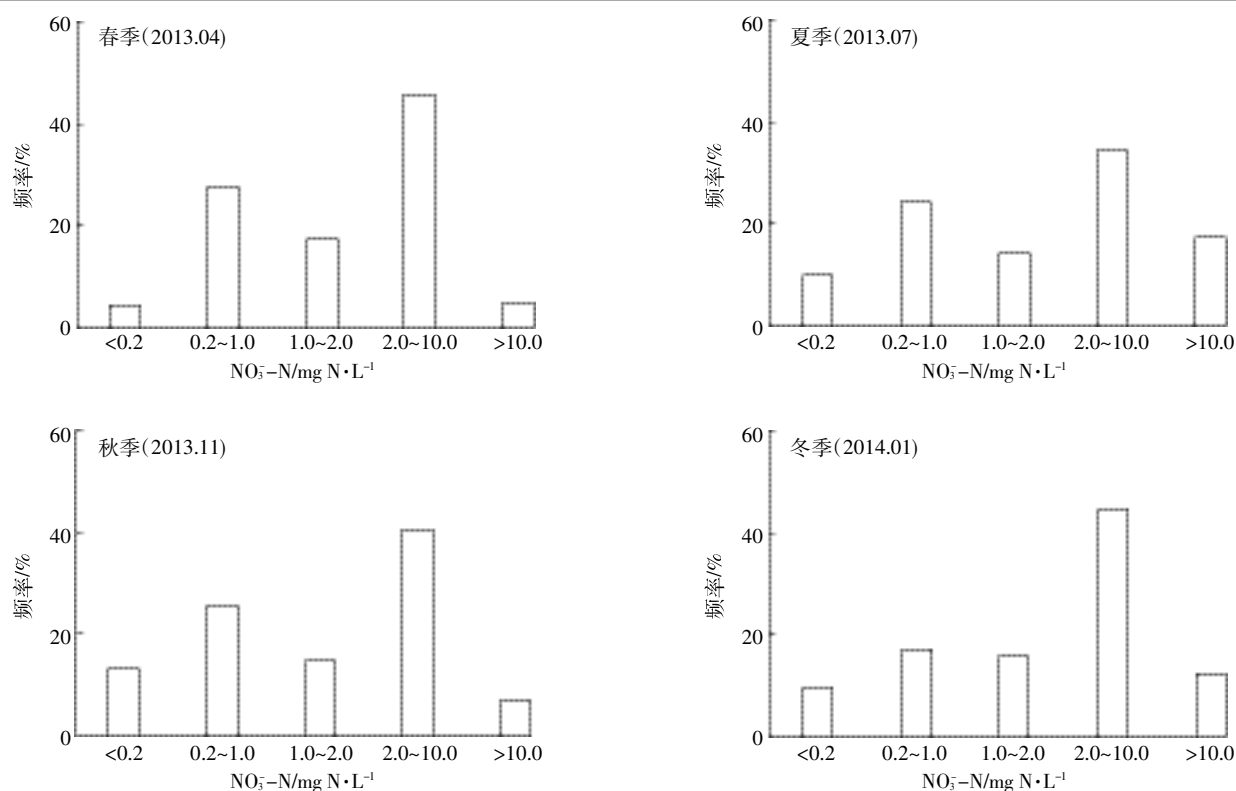
图 2 流域地下水 NO₃-N 空间分布

Figure 2 Spatial distribution of groundwater NO₃-N concentrations

秋季居民地与地下水 NO₃-N 浓度的决定系数随距离水井半径先上升而后下降,而夏季和冬季决定系数随距离水井半径增大而上升;春季和夏季农田决定系数随距离水井半径变化不大,而秋季和冬季随距离水井半径增加而变大。林地决定系数随距离水井半径大小没有显现明显季节性变化,四季都是随距离水井半径增大而增加。

3 讨论

金井农业流域地下水 NO₃-N 存在污染,含量平均为 0.67 mg N·L⁻¹,且占总数 4.9%~17.5%的样品超过 WHO 饮用水标准(> 10 mg N·L⁻¹)。地下水 NO₃-N 污染是一个全球性的问题。加拿大安大略省饮用水井 NO₃-N 超标率达 14%^[14],美国北卡罗来纳州 9000 眼家庭水井 NO₃-N 超标率为 31%^[15],丹麦地下水 NO₃-N 超标率为 8%^[16],澳大利亚东北部沿海地区超标率为 3%^[17],日本中部地区超标率达 30%^[18]。金井流域地下

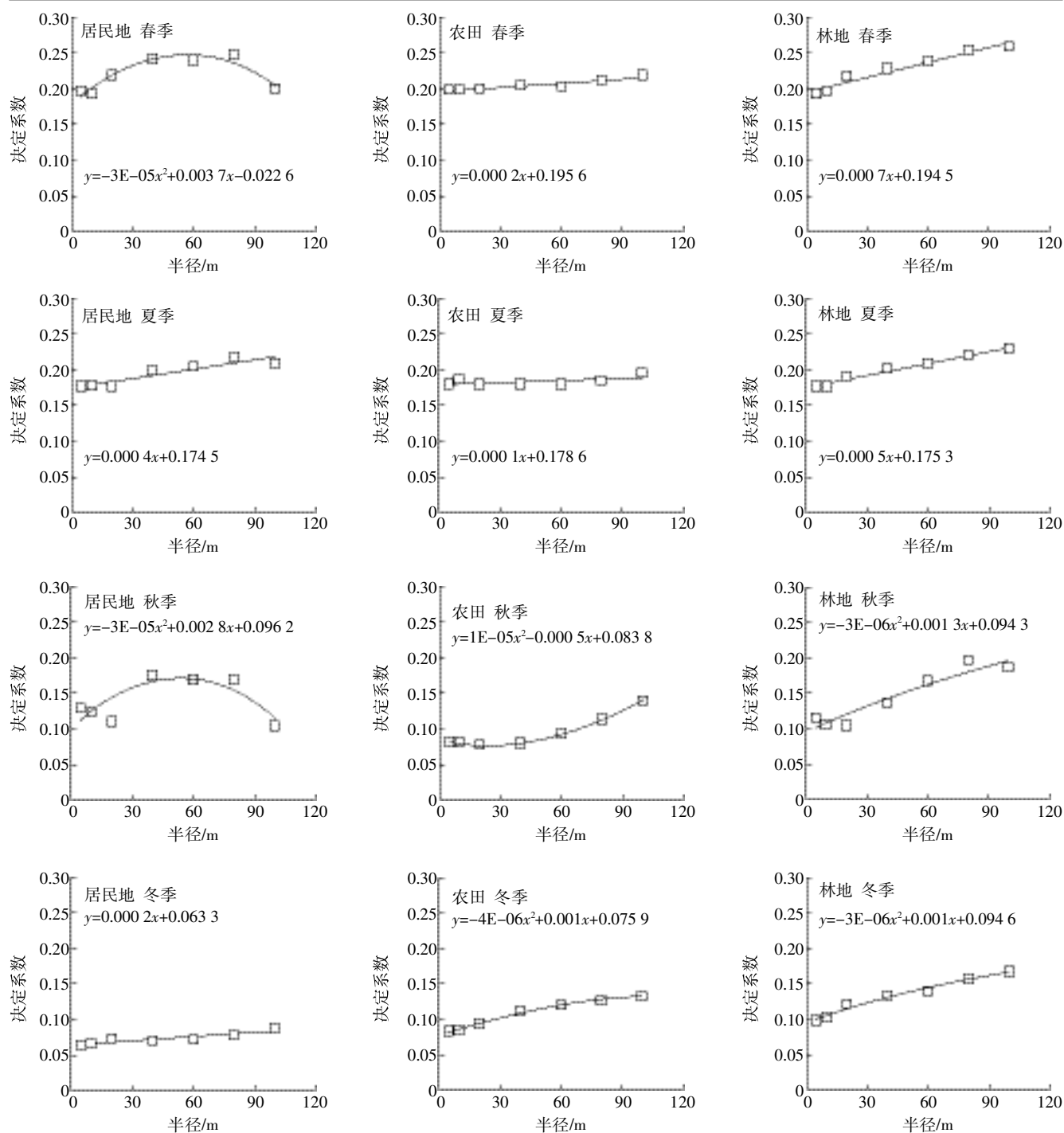
图 3 地下水 NO₃-N 浓度频率分布Figure 3 Frequency distribution of groundwater NO₃-N concentrations

水 NO₃-N 污染程度与大部分欧美发达国家和地区较为接近^[9]。金井流域地下水 NO₃-N 污染主要发生在农田和居民集中区域(图 3),夏季和冬季(图 4),表明流域地下水 NO₃-N 浓度与景观格局密切相关,且具有明显季节性变化。

农田施肥、居民生活污水和畜禽养殖是农业流域地下水系统主要的氮素来源^[20-21]。金井流域农田氮肥施用量为 374 kg N·hm⁻²·a⁻¹,其中淋失进入地下水系统为 7.4 kg N·hm⁻²·a⁻¹^[22]。Wang 等^[23]在金井流域的长期监测结果也表明,农田施肥量的增加会提高地下水中 NO₃-N 浓度。吕殿青等^[24]对陕西 167 眼水井的调查结果也表明,由于氮肥施用造成的水井地下水 NO₃-N 超标率可达 25%。森林通常被认为是流域氮“汇”。森林生态系统对大气沉降氮素和土壤氮素有良好的持留作用,因此金井流域东北部山林区地下水 NO₃-N 浓度较低。史晓亮等^[25]在诺敏河流域的研究结果也证明了在林地大规模减少且耕地明显增加的情况下,地下水 NO₃-N 浓度随之增加。调查表明金井流域生活污水中氮浓度在 100~200 mg N·L⁻¹。马立珊等^[26]对江苏吴县 76 眼水井的研究结果表明,当地农户生活污水排放中的 NO₃-N 含量超标率为 38%。水井作为当

地主要饮用水源常位于住户周围,由于当地缺乏生活污水收集和处理系统,且土壤为花岗岩发育,土壤孔隙发达,生活污水中氮素能迅速渗入地下水系统。金井流域较早就注意到了畜禽养殖对水环境的影响,自 2010 年就已经实施畜禽限养禁养政策,因此畜禽养殖对地下水 NO₃-N 污染的影响应当有限。

井水 NO₃-N 浓度和流域内 NO₃-N 的空间自相关性存在明显的季节性变化,应当与污染源排放氮素在土壤中纵向淋溶过程和流域尺度上氮素横向输移过程的季节性变化有关。在氮素纵向淋溶上,稻田受犁底层限制,土壤氮素淋溶过程主要受制于水管理制与施肥^[23]。金井流域早晚稻稻田主要为干湿交替水管理制模式,差异小;金井流域稻田施肥时间主要在每年 5 月初和 7 月中旬,由于土壤氮素迁移的滞后效应,地下水 NO₃-N 污染主要爆发期(夏季和冬季)要晚于施肥时间 2~5 个月(图 3)。金井流域内地下水位埋藏较浅,平均为 1.5 m,据此可推算出 NO₃-N 在土壤中的渗流迁移速率为每月 0.30~0.75 m,与江西红壤旱坡地降雨-渗漏过程驱动的 NO₃-N 渗流速率相近^[27]。夏季高温生活用水剧增时期和冬季外出务工人员春节返乡时期是生活污水排放的高峰期,氮素经

图4 土地利用方式组成与地下水 NO_3^- -N 浓度的决定系数Figure 4 Determine coefficients between land use composition and groundwater NO_3^- -N concentrations

高渗透性土壤能快速进入地下水,也会造成夏季和冬季水井中较高的 NO_3^- -N 污染频率(图4)。在氮素横向输移上, NO_3^- -N 不易被土壤吸附,常随地下水的流动而发生迁移,致使流域 NO_3^- -N 的空间分布呈现明显空间相关性。表2中 NO_3^- -N 的 Moran's I 全局指数在夏秋季节大而冬春季节小,可能与地下水补给量和

基流对 NO_3^- -N 的输移能力有关,因为金井流域地下水补给量和基流对 NO_3^- -N 的输移能力在夏秋季节大而冬春季节小^[22]。地下水文系统对 NO_3^- -N 的输移作用越大, NO_3^- -N 浓度的空间相关性也就越强。同时,夏秋季节土壤温度较高,深层土壤碳源匮乏,更有利于浅层地下水中硝化反应的进行^[28],这也会增强流域

尺度上井水 NO_3^- -N 浓度的空间相关性。

空间滞后模型计算结果表明,采样井中 NO_3^- -N 浓度与周围农田、林地、居民地面积比例都显著相关,且回归模型决定系数随季节和距离水井半径而变化(图4)。居民地生活污水氮磷排放量与住户家庭结构有关(水井周边单位居民地的人口数),春季和秋季期间居民地与地下水 NO_3^- -N 浓度的决定系数随距离水井半径先上升而后下降,表明在此期间居民地对水井 NO_3^- -N 浓度的影响主要是小空间尺度范围的(约 60 m 范围内)。这可能与春季和秋季期间居民生活污水排放数量较少有关。而夏季和冬季为生活污水氮磷排放高峰期,大量的生活污水氮磷可能会深入浅层地下水水体而造成较大面积的地下水 NO_3^- -N 污染,因此夏冬季节居民地水井中 NO_3^- -N 浓度距离水井半径增大而上升。春季和夏季农田面积比例与地下水 NO_3^- -N 浓度的决定系数随距离水井半径变化不大,秋季和冬季随距离水井半径增加而变大,主要是5月初和7月中旬大面积农田施肥和 NO_3^- -N 在土壤中迁移的滞后造成的。林地决定系数随距离水井半径变化没有表现出明显的季节性变化,四季都是随距离水井半径增大而增加,因此林地对地下水 NO_3^- -N 浓度的影响是大范围的。

很多研究明确了地下水 NO_3^- -N 污染防治对流域环境保护和饮用水安全的重要性,并采取了一系列措施,如削减肥料用量、控制养殖密度等^[29-30],然而这些实践操作很少考虑流域景观对地下水 NO_3^- -N 的影响。本研究表明流域景观格局与地下水 NO_3^- -N 密切相关,且二者之间的相关性具有明显的时空效应。这种时空效应一方面来自于流域景观生态系统中地下水系统的氮素输入数量与动态特征,另一方面来自于地下水文过程特征(如地下水补给、流速、对溶质迁移能力等)。美国的研究已经表明,即使在削减肥料用量几十年以后,地下水中 NO_3^- -N 浓度也很难明显降低^[29]。在欧美一些发达国家已经把流域景观规划列为防控地下水 NO_3^- -N 污染的重要手段。本研究结果强调了流域土地利用方式对地下水 NO_3^- -N 浓度影响的季节性,有助于运用流域景观规划手段保障地下水饮用安全的实践操作,为合理实施流域景观规划提供了基础技术依据。然而需要指出的是,本研究只明确了流域景观格局对地下水 NO_3^- -N 的影响及其时空效应,对于流域景观格局如何在不同时空尺度上影响地下水 NO_3^- -N 的机理尚不清楚,未来还需要在不同时空尺度景观格局下氮素淋失与地下水 NO_3^- -N 输移、不同景观单元间的氮素交换理论等方面进一步深入研究。

4 结论

(1)金井流域地下水 NO_3^- -N 浓度主要分布在0.2~1.0 $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.0~10.0 $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内。由于农田高强度施肥和肥料氮素向地下水迁移的滞后效应,金井流域夏季和冬季 NO_3^- -N 浓度超过世界卫生组织饮用水标准(>10 $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$)频率比春秋季节要高。

(2)金井流域地下水 NO_3^- -N 浓度呈现明显的空间自相关性,且夏季和秋季的空间自相关性较强,而冬春季的空间自相关性相对较弱。

(3)空间滞后模型对不同拟合结果表明地下水 NO_3^- -N 浓度与农田、林地、居民地的面积比例显著相关,且其相关的决定系数随季节和距离水井半径不同而变化,表明景观格局对地下水 NO_3^- -N 浓度的影响具有明显的时空效应。

(4)未来需进一步定量流域景观格局与地下水 NO_3^- -N 浓度的关系,深入研究不同时空尺度景观格局下氮素淋失与地下水 NO_3^- -N 输移、不同景观单元间的氮素交换理论,定量景观格局特征与地下水 NO_3^- -N 污染的关系。

参考文献:

- [1] WHO. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th edition[EB/OL]. http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_guidelines/en/
- [2] Bruijnzeel L A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees[J]. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 2004, 104(1): 185-228.
- [3] 郭建国. 景观生态学: 格局过程尺度与等级[M]. 二版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WU Jian-guo. Landscape ecology: Scale processes and levels[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [4] 喻理飞. 人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 529-532.
YU Li-fei. Evaluation on degradation of karst forest community and human disturbance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 529-532.
- [5] Lang Y C, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Geochemistry of surface and ground water in Guiyang, China: Water/rock interaction and pollution in a karst hydrological system[J]. *Applied Geo-Chemistry*, 2006, 21(6): 887-903.
- [6] 许迪, 龚时宏, 李益农, 等. 农业水管理面临的问题及发展策略[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 1-7.
XU Di, GONG Shi-hong, LI Yi-nong, et al. Problems and strategies on development of agricultural water management[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 1-7.
- [7] 裴宏伟, 王彦芳, 沈彦俊, 等. 美国高平原农业对地下水资源的影响及启示[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(1): 166-173.
PEI Hong-wei, WANG Yan-fang, SHEN Yan-jun, et al. The impacts and enlightenments of irrigated agriculture on groundwater resources in

- the U. S. High Plains[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(1):166-173.
- [8] 杨凤飞, 刘 峰, 尹黎明, 等. 亚热带典型分散式养殖农区的环境污染特征研究[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(1):114-117.
YANG Feng-fei, LIU Feng, YING Li-ming, et al. Study on characteristics of environmental pollution in rural area with typical decentralized animal breeding in subtropical region[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(1):114-117.
- [9] 孙才志, 奚 旭, 董 璐. 基于 ArcGIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价及空间结构分析[J]. *生态学报*, 2015, 35(20):6635-6646.
SUN Cai-zhi, XI Xu, DONG Lu. An ArcGIS-based analysis of groundwater spatial structure and groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20):6635-6646.
- [10] 刘晓晨, 孙占祥. 地下水硝态氮污染现状及研究进展[J]. *辽宁农业科学*, 2008(5):41-45.
LIU Xiao-chen, SUN Zhan-xiang. Present situation and research progression on nitrate contamination of groundwater[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2008(5):41-45.
- [11] 徐运清, 秦红灵, 全 智, 等. 长期蔬菜种植对菜地土壤剖面硝酸盐分布和地下水硝态氮含量的影响[J]. *农业现代化研究*, 2015, 36(6):1084-1085.
XU Yun-qing, QIN Hong-ling, QUAN Zhi, et al. Effects of long-term vegetable cultivation on the NO_3^- -N contents in soil profile and groundwater[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(6):1084-1085.
- [12] 李 航, 王 毅, 宋立芳, 等. 中亚热带典型农业小流域氮素输出特征及监测采样频率研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(10):2668-2674.
LI Hang, WANG Yi, SONG Li-fang, et al. Nitrogen export characteristics and sampling frequency for nitrogen monitoring from a typical small agricultural catchment in central subtropics [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(10):2668-2674.
- [13] Anselin L, Getis A. Spatial statistical analysis and geographic information systems[J]. *Annals of Regional Science*, 1992, 26(1):19-33.
- [14] Goss M J, Barry D A J, Rudolph D L. Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture:1. Results from drinking water wells[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 32(3/4):267-293.
- [15] Jennings G D, Sneed R E, Huffman RH, et al. Nitrate and pesticide occurrence in North Carolina Wells[M]//Joseph S. ed. International Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers. Michigan, Frankfort, 1991.
- [16] Overgaard K. Trends in nitrate pollution of groundwater in Denmark[J]. *Nordic Hydrology*, 1989, 15(4/5):177-184.
- [17] Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L, et al. Nitrate in ground waters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2003, 94(1):49-58.
- [18] Babiker I S, Kato K, Ohta K, et al. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system[J]. *Environment International*, 2004, 29(8):1009-1017.
- [19] 刘宏斌. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3):406-413.
LIU Hong-bin. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):406-413.
- [20] 王庆锁, 顾 颖, 孙东宝. 巢湖流域地下水硝态氮含量空间分布和季节变化格局[J]. *生态学报*, 2014, 34(15):4372-4379.
WANG Qing-suo, GU Ying, SUN Dong-bao. Spatial and seasonal variations of nitrate-N concentration in groundwater within Chao Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15):4372-4379.
- [21] 赵 杨, 刘 方, 蒲通达, 等. 贵阳市城郊区不同土地利用方式下浅层地下水硝态氮含量的变化[J]. *江西农业学报*, 2009, 21(2):119-122.
ZHAO Yang, LIU Fang, PU Tong-da, et al. Effect of land use pattern on content of NO_3^- -N in shallow groundwater in Guiyang City[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(2):119-122.
- [22] Wang Y, Liu X L, Li Y, et al. Rice agriculture increases base flow contribution to catchment nitrate loading in subtropical Central China[J]. *Agri Ecosyst Environ*, 2015, 214:86-95.
- [23] Wang Y, Li Y Y, Li Y, et al. Intensive rice agriculture deteriorates the quality of shallow groundwater in a typical agricultural catchment in subtropical Central China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 22(17):13278-13290.
- [24] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1):8-15.
LÜ Dian-qing, TONG Yan-an, SUN Ben-hua. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1998, 4(1):8-15.
- [25] 史晓亮, 李 颖, 赵 凯, 等. 诺敏河流域土地利用与覆被变化及其对水文过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1):3046-3056.
SHI Xiao-liang, LI Ying, ZHAO Kai, et al. Land use/cover change and its effects on hydrologic processes in Nuomin River basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(1):3046-3056.
- [26] 马立珊, 钱敏仁. 太湖流域水环境硝态氮和亚硝态氮污染的研究[J]. *环境科学*, 1987, 8(2):60-65.
MA Li-shan, QIAN Min-ren. Pollution of nitrate and nitrite in water environment of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 1987, 8(2):60-65.
- [27] Wang Y, Zhang B, Lin L, et al. Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China[J]. *Agri Ecosyst Environ*, 2011, 140(3):441-453.
- [28] Collins R, Jenkins A, Harrow M. The contribution of old and new water to a storm hydrograph determined by tracer addition to a whole catchment[J]. *Hydrol Proc*, 2000, 14(4):701-711.
- [29] 周 凯, 雷泽勇, 王智芳, 等. 河南省畜禽养殖粪便年排放量估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5):1060-1065.
ZHOU Kai, LEI Ze-yong, WANG Zhi-fang, et al. Estimation of annual total livestock/poultry excrement in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5):1060-1065.
- [30] Tesoriero A J, Duff J H, Saad D A S, et al. Vulnerability of streams to legacy nitrate sources[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(8):3623-3629.