中国生态农业学报 2018 年 10 月 第 26 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2018, 26(10): 1476−1482

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180639

王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1476−1482
WANG S Q, ZHENG W B, KONG X L. Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1476−1482

华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性*

王仕琴[1], 郑文波[1], 孔晓乐[1,2]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 华北平原地下水硝酸盐污染备受关注, 然而受地貌类型、土地利用、土壤结构、含水层水文地质条件等因素差异性的影响, 对区域尺度上农区浅层地下水硝酸盐污染程度和特征尚没有统一定论。本文通过综述过去华北平原地下水硝酸盐污染程度的相关研究, 并结合近年来对华北平原农业种植区浅层地下水硝酸盐研究所取得的认识, 指出补给源区(太行山低山丘陵区)、山前平原和低平原 3 个典型地貌类型区浅层地下水硝酸盐研究存在的问题: 补给源区土地利用变化多样、土壤和含水层渗透性好, 要重视对源区氮输入的控制, 加强低山丘陵区气候变化对水文过程和氮迁移过程影响机制的研究; 山前平原区是农业高产区, 地下水埋深较深且包气带厚度大, 较高的浅层地下水硝酸盐浓度除了与点源、污水渗漏以及污水灌溉等直接影响因素有关外, 农田过量肥料施用对地下水硝酸盐影响的程度、水氮迁移路径以及未来潜在风险是农区地下水硝酸盐研究中亟需关注的问题; 低平原区较细的土壤沉积结构减缓了氮向下迁移的速度, 但地下水埋深较浅, 二者的制约关系决定了地下水硝酸盐浓度, 因此应在理解地表水-土壤-地下水转化关系的基础上评估地下水硝酸盐污染的风险。

关键词: 地下水; 硝酸盐污染; 土地利用; 地貌类型; 包气带; 华北平原
中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)10-1476-07

Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the North China Plain*

WANG Shiqin[1], ZHENG Wenbo[1], KONG Xiaole[1,2]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Nitrate contamination of groundwater in the North China Plain had attracted much attention. However, the characteristics and degree of nitrate contamination of groundwater on large scale were not uniform due to the effect of different factors such as landscape type, land-use, soil structure, and aquifer hydrogeology. This paper comprehensively summarized some studies on the status of nitrate pollution in groundwater in the North China Plain. It also included our results on nitrate concentration in shallow groundwater in agricultural areas in the North China Plain in recent years. It was found that nitrate pollution in shallow groundwater

* 国家重大科技专项项目(2016YFD0800100)、中国科学院科技服务网络(STS)计划项目(KFJ-STS-ZDTP-001)和国家自然科学基金面上项目(41471028, 41530859)资助
王仕琴, 主要研究方向为水文循环与地下水环境。E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2018-07-05 接受日期: 2018-07-15
* The study was supported by the National Key R&D Program of China (2016YFD0800100), the Science and Technology Service Network Initiative of Chinese Academy of Sciences (KFJ-STS-ZDTP-001) and the National Natural Science Foundation of China (41471028, 41530859).
Corresponding author: WANG Shiqin, E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn
Received Jul. 5, 2018; accepted Jul. 15, 2018

existed in three typical landscape types, including headwater area (hilly areas of Taihang Mountain), piedmont plain and lowland plain. The headwater area had different land-use and good soil and aquifer permeability and therefore required much attention in terms of controlling nitrogen input. There was also the need for researches on how climate change affected hydrological process and nitrogen transport in the region. The piedmont plain had high agricultural production, with deep groundwater depth and thick saturated zone. Relatively high nitrate concentration in the piedmont plain was not only related to point source, wastewater leakage and wastewater irrigation, but also to over application of fertilizer in the farmland. The impact of over application of fertilizer on groundwater, the flow path and the potential threat on shallow groundwater quality were very important for future researches. The leaching rate of nitrate was lowered due to the fine sediment of soil in the lowland area. However, groundwater was at high risk of nitrate contamination because of the shallow groundwater depth. There was therefore the need for correct assessment of potential risks of nitrate pollution of groundwater based on surface water, soil and groundwater interactions.

Keywords: Groundwater; Nitrate pollution; Land use; Landscape type; Unsaturated zone; North China Plain

地下水硝酸盐污染在全球范围内较为普遍, 特别是在过去几十年, 受城市化污水渗漏及集中农业活动中过量化肥施用等的影响, 地下水中硝酸盐浓度具有逐年上升的趋[1-4]。通常农业区氮肥的过量施用和较高的灌溉水量, 使得农区硝酸盐浓度普遍较高[5], 如美国高平原、印度北部和中国华北地区地下水硝酸盐浓度污染较为突出。华北平原是我国主要的粮食主产区, 地下水超采严重, 农业活动中氮肥消耗量已经达到 450~600 $kg \cdot hm^{-2}$, 远远超过作物生长所需氮量, 且高于世界其他国家的氮肥施用量。水资源短缺、低的水分利用效率和氮素利用效率以及地下水硝酸盐污染是华北平原面临的主要问题[6]。然而, 由于华北平原城镇和农田交错分布, 存在排污和化肥施用等多种污染源, 正确认识区域尺度上农区浅层地下水硝酸盐分布特征和影响因素, 对于华北地下水环境保护非常重要。

地下水硝酸盐来源主要包括污水、畜禽养殖粪便和厕所排污、土壤、大气氮沉降、化肥和有机肥施用等多种来源。农区流域通常农田和居民区交错分布, 地下水硝酸盐来源也体现出多源性的特征。其迁移转化过程和浓度变化主要受到物理过程(如补给速率、氮肥施用量、混合稀释、水文迁移路径)以及地球化学反应过程(如矿物组成和氧化还原)的影响[7]。很多研究表明高施氮量、较高的水分输入量以及排水性较好的土壤、裂隙岩或有效孔隙度较大的含水层, 以及氮消减过程的缺失会造成地下水中较高的硝酸盐浓度[8-9]。其中土地利用通常决定着氮的输入量, 居民区、农田等人类活动频繁的地区地下水硝酸盐浓度显著大于自然植被等人类活动影响较弱的地区。此外, 降水条件(降水量、降水强度和降水历时等)和灌溉条件均影响着补给速率、水文迁移路径, 造成地下水硝酸盐浓度的季节性变化。华北平原人类活动频繁, 土地利用变化多样, 从补给区到排泄区包括冲洪积扇、冲洪积平原、泛滥平原、洼地湖泊、河道带、滨海平原等多种地貌类型, 因此该地区地下水环境一方面与地表氮输入源(污水排放等点源和农田面源)密切相关; 另一方面, 由于氮素从地表进入地下水过程中受到土壤质地、气候条件、地下水埋深、含水层水文地质条件和氧化还原反应条件差异性等影响, 使得华北平原不同地区地下水硝酸盐污染的程度体现出较大的差异性。

本文在分析总结地下水硝酸盐主要来源和影响因素的基础上, 总结过去华北平原地下水硝酸盐污染现状, 综述近年我们对补给源区(太行山低山丘陵区)、山前平原以及低平原等不同地貌沉积类型和不同水文地质单元浅层地下水硝酸盐研究的主要结果, 旨在加深对华北大区域尺度浅层地下水硝酸盐分布特征和影响因素的认识, 防止未来气候变化和人类活动加剧导致的地下水硝酸盐污染风险。

1　华北平原地下水硝酸盐污染现状

近年来华北平原地下水硝酸盐方面的诸多研究既涉及华北平原、环渤海、华北各省市等大区域尺度, 也涉及蔬菜区、污灌区、污水河影响区等典型地区(图 1)。不同的研究关于地下水硝酸盐超标率(超过 WHO 饮用水标准 50 $mg \cdot L^{-1}$)的结果体现出较大的差异性。如早期研究指出华北平原 53.6%的地下水硝酸盐超标[10], 然而由于采样点较少(69 个)且多集中在农户区, 特别是 20 世纪 90 年代地下水埋深浅, 农户区浅层地下水不能代表华北平原区域上整体的硝酸盐污染状况; 而赵同科等[11]针对环渤海 7 省市共 1 139 个采样点的研究结果表明, 34.1%的地下水硝酸盐超标, 由于采样点多集中在低平原区, 所以较高的硝酸盐超标率反映了地下水埋深较浅地区的污染特征, 这也说明地下水埋深浅含水层污染脆弱性高; Chen 等[12]于 1998 年采集了山前平原、中部平原和滨海平原不同地貌类型区的地下水, 硝酸盐超标率仅为 9.5%, 虽然样品数不多(共 293 个点), 但采样点考虑了华北平原区域差异性, 具有一定代表性;

这与茹淑华等[13]2006—2012 年针对河北 11 个省市共 3 500 个点的调查结果相差较大(超标率 22%)。而针对其他省市的地下水硝酸盐污染程度也不同，如河南省 43 个县(包括深井总共 537 个点)、山东省 16 个县(516 个点，平均取水深度为 35.5~43.4 m)、北京 11 个区以及天津 10 个区的地下水硝酸盐超标率分别为 31.4%、14.2%、19.36%、20%[14-17]。这些研究对认识华北各地区地下水硝酸盐特征提供了重要的基础，但是综合来看，对于华北平原区域尺度地下水硝酸盐污染程度没有统一定论，也不能一概而论其污染程度高低。分析超标率差异性的原因：一是部分研究没有明确区分含水层深度，由于氮污染源主要来自于地表输入，因此较浅的含水层污染程度大于深层，如北京农区浅层 3~6 m 含水层地下水硝酸盐超标率显著高于 100~120 m 含水层[18]；二是部分研究统计包括了农户、蔬菜、小麦玉米、污水区等不同类型，氮源不同造成污染程度的差异性。研究均认为施肥是引起地下水硝酸盐超标的普遍因素之一。我们于 2016 年针对农田作物类型，对北京南部以及河北省 325 个浅层地下水调查结果显示，地下水硝酸盐超标率 18%(未发表)，大于 1998 年农田灌溉井地下水硝酸盐超标率 11.8%(根据 Chen 等[12]数据，剔除了深层饮用水采样点)。可见，近 20 年来区域尺度上农区浅层地下水硝酸盐具有上升趋势。

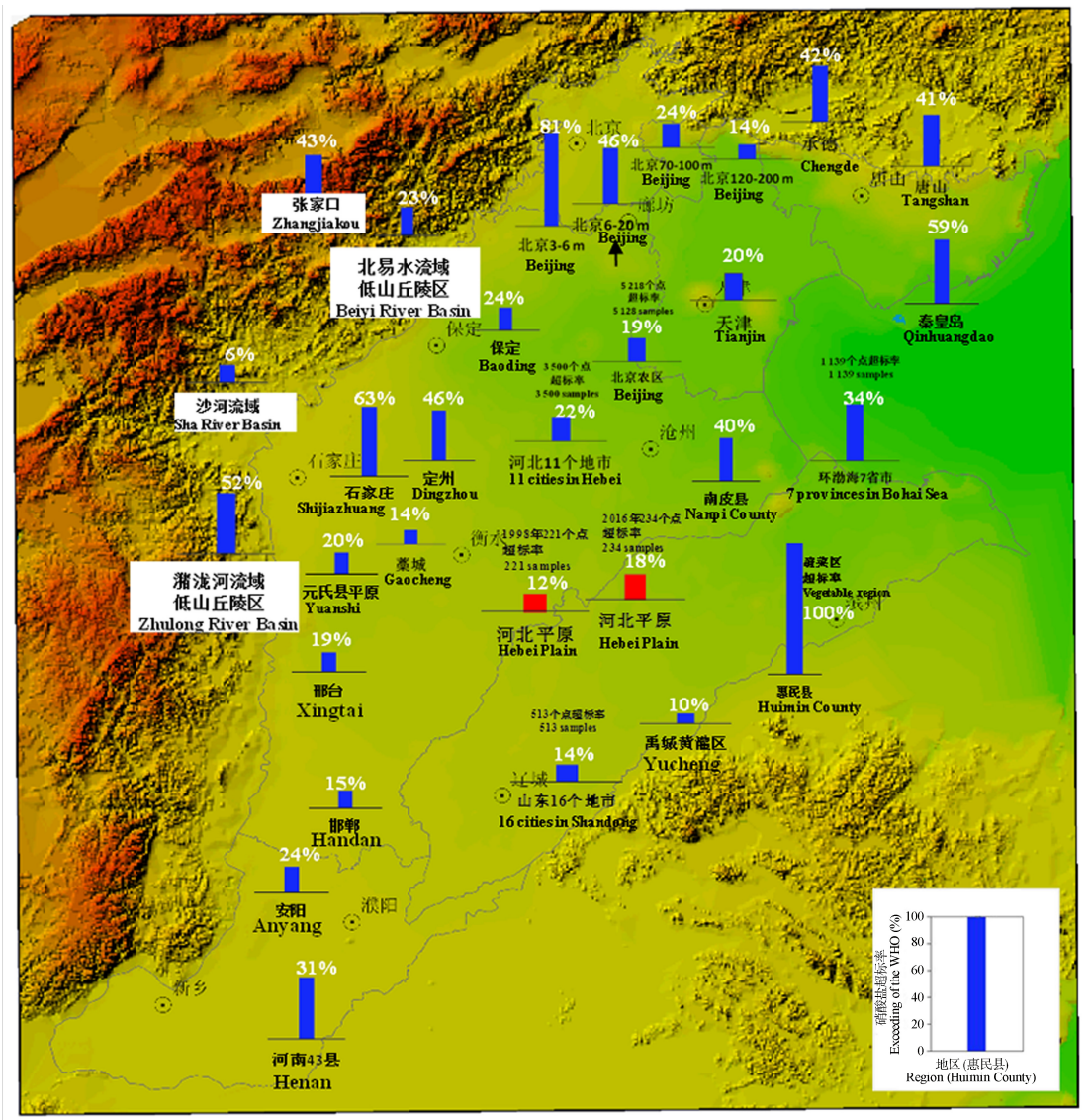

图 1　华北地区地下水硝酸盐浓度超标率(超 WHO 标准)

Fig. 1　The rate of nitrate concentration exceeding the WHO standard in groundwater of the North China Plain

统计值部分根据文献[10-14,16,18-25]；部分根据调研数据，如河北平原 18%的超标率、南皮县北部农区 40%的超标率等。Most values in the figure are from the references [10-14,16,18-25]. Some are investigation results, such as 18% exceeding rate in the Hebei Plain, 40% exceeding rate in north rural area of Nanpi County.

小尺度的研究主要集中在平原区特殊地区的浅层地下水, 其硝酸盐浓度分布特征和影响因素反映了不同地貌类型区氮输入和淋溶条件(埋深和渗透性等)的差异性[20,22,26-27]。如针对华北平原北部滦河冲积扇地区研究表明, 55 个采样点有 69%超过了 WHO 标准, 而硝酸盐的平均值达到了 86.8 mg·L^{-1}[27]; 石家庄市污灌区浅层地下水硝酸盐超标率大于 50%[20]; 山东惠民县地下水埋深浅, 蔬菜区高施肥和高灌溉影响使得研究区浅层地下水(井深<15 m)硝酸盐 100%超标[26]。然而, 从空间尺度上, 华北低山丘陵区作为平原区的补给源区, 近年来人类活动频繁, 对该地区地下水硝酸盐的研究较少[23,25,28-29]。近年我们对太行山低山丘陵区的研究也发现, 受人类活动影响, 该区域地下水受到污水、农村厕所、畜禽养殖以及农田面源污染影响硝酸盐污染不容忽视。

因此, 我们的研究集中在补给源区和华北平原区, 针对补给区识别土地利用和气候变化对源区地下水硝酸盐影响的机制, 针对平原区不同埋深、土壤条件和水文地质条件, 对硝酸盐迁移转化过程研究的侧重点有所区别。

2　不同地貌类型区地下水硝酸盐研究的关键问题

2.1　控制低山丘陵区地表氮源输入

山区通常由于地形复杂、土地利用多样, 污染源、地形坡度、土壤风化层渗透性、地下水地表水关系以及地下水流动路径等诸多因素影响氮的淋滤过程, 并决定着流域出口地表径流水质, 因此, 明确这些因素对地下水硝酸盐作用的机制也是补给源区流域研究的关键。太行山低山丘陵区是华北平原的水源涵养区, 属农林生态系统, 近年来农田和农户区面积增加, 地下水硝酸盐污染凸显。如滹沱河上游地区, 不同水体硝酸盐浓度变化范围为 1.7~87.4 mg·L^{-1}, 大多数地下水受到污水和粪便污染源影响[28]。而我们在北易水河流域和潴泷河流域研究结果也表明, 所有采样点中地下水硝酸盐超标率分别达到 23%和 52%, 氮氧同位素溯源揭示有机肥是农田和经济林区地下水硝酸盐的主要来源[23,25,29]。利用 CFCs 地下水年龄示踪进一步揭示了浅层裂隙水主要受近 40 年的新水和 1960 年前的老水混合补给[24,30], 说明过去历史时期土地利用变化和有机肥施用与现在地下水硝酸盐浓度密切相关。气候变化和人类活动威胁上游源区水环境安全, 一方面, 农田面积增加, 减少了山区径流量, 过量化肥的投入在平水和枯水年储存于土壤, 氮向地下水迁移的量也减少; 另一方面, 极端降水的增加, 会导致土壤中累积的氮大量进入河道和含水层, 严重威胁下游平原区地表和地下水质。以潴泷河流域为例, 1987—2015 年低山丘陵区的农田、经济林和农户区面积分别增加了 20%、1 331%、168%, 极端降水(2016 年“7.19”大暴雨时间, 两天降水量 500 mm)引起地下水硝酸盐浓度上升了 1~7 倍, 超标率从暴雨前的 52%上升为 89%, 所有地表径流硝酸盐超标, 硝酸盐来源和迁移路径均发生了很大的变化。研究表明, 从低山丘陵区进入平原区, 来自山前断裂带淡水的混合和稀释作用以及地下水沿程的反硝化作用可造成硝酸盐浓度降低[24], 但在气候等水文要素变化条件下, 物理因素和生物化学过程如何相互作用影响地下水硝酸盐浓度的机制仍然不清楚。因此, 加强低山丘陵区气候变化和水文过程对硝酸盐迁移影响的研究, 加强源区地表氮源输入的控制, 对减少源区流域出口氮输出并防止平原地下水硝酸盐污染非常重要。

2.2　重视山前平原地下水硝酸盐污染的直接和潜在风险

华北山前平原城市人口集中, 为农业高产区, 其典型特征是地下水超采造成的地下水埋藏较深, 包气带厚度大。地下水硝酸盐的直接污染源除了工业和生活污水集中排放等点源污染外, 城市污水入河, 污水渗漏和农业污水灌溉成为地下水的直接补给源。我们的研究表明, 因河流渗漏的影响范围有限, 且反硝化和稀释作用通常使得污染程度具有降低的趋势[23,31-32], 对地下水水质的影响不及农田面源污染普遍。而长期污水灌溉引起地下水硝酸盐污染在含水层渗透性较好的地区, 如石家庄滹沱河流域的姣河污灌区, 污水渗漏和长期污水灌溉引起地下水硝酸盐浓度较高也被很多研究者关注[12,20]。

农业活动中过量氮肥在土壤中累积, 在大区域尺度上已经成为地下水硝酸盐污染的潜在风险。据报道北方小麦、玉米、露地蔬菜、设施蔬菜和果树区 0~4 m 土壤剖面硝酸盐累积量分别达(453±39) kg(N)·hm^{-2}、(749±75) kg(N)·hm^{-2}、(1 191±89) kg(N)·hm^{-2}、(1 269±114) kg(N)·hm^{-2}和(2 155±330) kg(N)·hm^{-2}[33]。除了土壤表层, 深层土壤剖面也存在不同程度的硝酸盐累积。以华北栾城小麦玉米轮作农田为例, 地表以下 12 m 处硝态氮的浓度最高已经达到 55 mg·L^{-1}, 0~20.4 m 的土壤剖面所累积的硝态氮总含量达 1 769 kg(N)·hm^{-2}[34-35]。小麦玉米轮作是该区域主要的种植体系, 小麦季过量开采地下水用于农业灌溉, 而过量的氮肥进入土壤并在土壤中累积, 玉米季进一步通过降水的淋滤作用迁移

到深层土壤。然而，过去 30 年，地下水采补不平衡引起地下水漏斗扩大，山前平原地下水水位以每年 0.5~0.7 m 的速度下降，按照小麦玉米区硝酸盐淋失的速度(根据我们计算结果，10 m 以上平均淋失速度 0.44 $m \cdot a^{-1}$ 和淋失率 15.5%，未发表)，以及通过包气带反硝化对硝酸盐的消减作用(反硝化率 20%)，大量施用的化肥是否已经进入地下水，或在渗透性好的地区硝酸盐是否会通过优先通道进入含水层，仍然是目前研究争议的焦点。根据我们 2016 年对河北平原地下水硝酸盐调查结果表明，山前平原地下水硝酸盐平均值和中位数均显著大于中部平原，且在山前平原地下水硝酸盐浓度中位数顺序为：蔬菜区(39.1 $mg \cdot L^{-1}$)>小麦玉米区(24.4 $mg \cdot L^{-1}$)>养殖场(17.8 $mg \cdot L^{-1}$)>果树区(10.8 $mg \cdot L^{-1}$)(图 2)。可见，蔬菜区的高施肥和高灌溉已是地下水硝酸盐浓度上升的直接原因，如定州和藁城[36]等蔬菜区是华北农田面源污染风险最高的地区之一，而小麦玉米等其他土地利用类型土壤累积的氮将成为未来地下水污染的潜在风险。

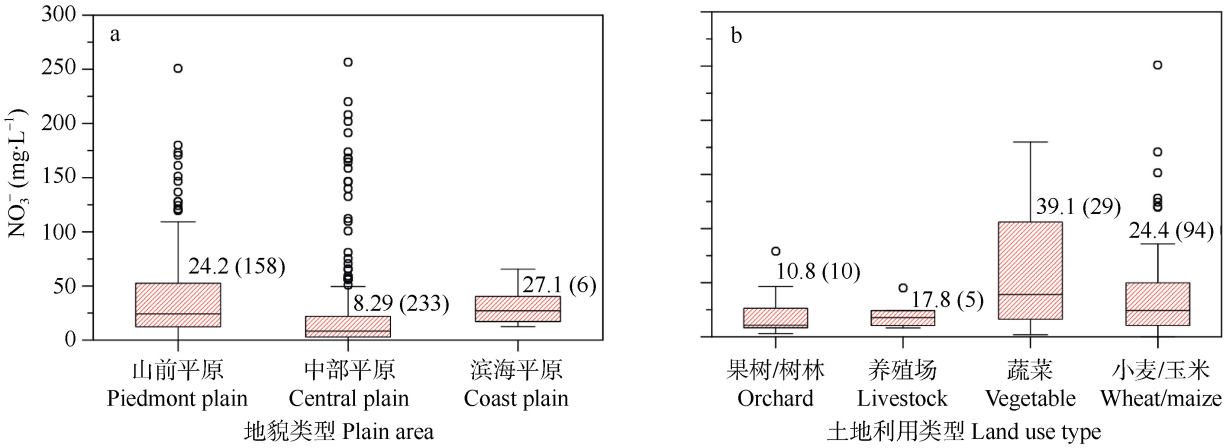

图 2 2016 年华北平原不同地貌类型(a)和不同土地利用(b)地下水硝酸盐浓度 Box-Whisker 统计图

Fig. 2 Box-Whisker plots of NO_3^--N concentration of groundwater in different plain areas (a) and under different land use types (b)

箱上数字为中位数，括号内数字为采样点数。The number beside the box is the value of the median and the number in parentheses is the number of sample.

2.3 低平原区地下水硝酸盐污染的脆弱性

华北东部地形平缓，地下水埋深较浅，地表污染物进入含水层的路径较短，浅层地下水易受污染；另一方面，由于土壤沉积颗粒较细、污染物迁移速度较低，对污染物向下迁移具有屏障作用。地下水埋深和迁移速度两个要素之间的平衡，决定地下水硝酸盐浓度。根据前人研究结果，低平原地下水硝酸盐污染较为普遍，工厂排污、畜禽养殖、人类排污和化肥是主要因素[11]。然而，与山前平原相同，累积在农田土壤中的硝酸盐仍然是地下水浅埋区硝酸盐浓度上升的潜在风险。我们近期的研究表明，低平原农区地下水硝酸盐变化对降水和灌溉等水文要素的响应较为显著，同时受地表水地下水相互作用的影响[37]，地表水和浅层地下水硝酸盐浓度，体现出明显的季节性动态变化特征，说明含水层的脆弱性。因此，在地下水浅埋区应在充分认识地表水-土壤-地下水转化关系的基础上，研究硝酸盐的迁移转化过程。

综上，将华北低山丘陵区到平原区不同土地利用类型与地下水硝酸盐来源、迁移转化之间的关系可以概化为如图 3 所示概念图。不同地貌类型地下水硝酸盐分布既有区域特征、不同地貌类型单元之间变化受水流作用的影响也具有相互联系性。

3 结论和展望

综上所述，认识华北地区地下水硝酸盐污染应考虑含水层深度、时间变化以及特殊地区差异性。从垂直深度上，硝酸盐污染主要集中在浅层含水层(第Ⅰ和第Ⅱ含水层组，井深在 120 m 以内)。从时间尺度上，近 20 年来浅层地下水硝酸盐浓度呈现出逐年上升的趋势。从空间尺度上，华北低山丘陵区作为平原区的补给源区，近年来人类活动频繁，地下水硝酸盐污染问题日益凸显，未来需进一步研究气候变化或极端气候对水文过程和氮迁移过程的影响；山前平原和滨海平原受地下水埋深、土壤质地和水文地质条件的控制，使得影响氮素迁移的物理过程和化学反应不同，从而造成较大的区域差异性，因此，解析关键因素之间的平衡，对于正确评估地下水硝酸盐污染潜在风险有重要意义。

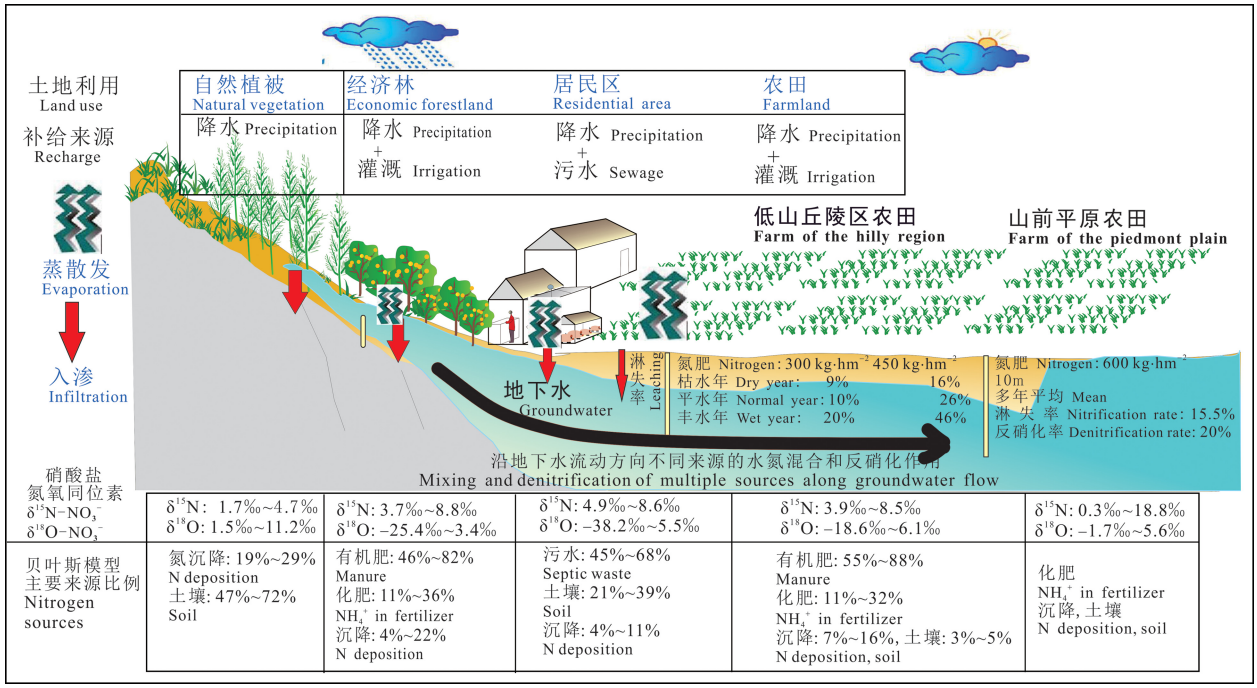

图 3　华北低山丘陵区与平原区不同土地利用类型对地下水硝酸盐分布和来源的影响机制概念图[29]

Fig. 3　Impact of land use on source and fate of nitrate in groundwater in the hilly and plain areas of the North China Plain[29]

参考文献 References

[1] HALLBERG G R, KEENEY D R. Nitrate in Regional Groundwater Quality[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993: 297–322

[2] MUELLER D K, HAMILTON P A, HELSEL D R, et al. Nutrients in ground water and surface water of the United States: An analysis of data through 1992[R]. Reiston, Virginia: U.S. Geological Survey, 1995: 77

[3] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China — Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 63(1/2): 117–127

[4] NAKAGAWA K, AMANO H, TAKAO Y, et al. On the use of coprostanol to identify source of nitrate pollution in groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 663–668

[5] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254–257

[6] HU K L, HUANG Y F, LI H, et al. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain[J]. Environment International, 2005, 31(6): 896–903

[7] LIAO L X, GREEN C T, BEKINS B A, et al. Factors controlling nitrate fluxes in groundwater in agricultural areas[J]. Water Resources Research, 2012, 48(48): 72–84

[8] NOLAN B T, HITT K J. Vulnerability of shallow groundwater and drinking-water wells to nitrate in the United States[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(24): 7834–7840

[9] BUROW K R, NOLAN B T, RUPERT M G, et al. Nitrate in groundwater of the United States, 1991–2003[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(13): 4988–4997

[10] ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1996, 59(3): 223–231

[11] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 等. 环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 779–783
ZHAO T K, ZHANG C J, DU L F, et al. Investigation on nitrate concentration in groundwater in seven provinces (city) surrounding the Bo-Hai Sea[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2): 779–783

[12] CHEN J Y, TANG C Y, SAKURA Y, et al. Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(3): 481–492

[13] 茹淑华, 张国印, 孙世友, 等. 河北省地下水硝酸盐污染总体状况及时空变异规律[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 48–52
RU S H, ZHANG G Y, SUN S Y, et al. Status of the contamination and spatial-temporal variations of nitrate in groundwater of Hebei Province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2013, 30(5): 48–52

[14] 郭战玲, 沈阿林, 寇长林, 等. 河南省地下水硝态氮污染调查与监测[J]. 农业环境与发展, 2008, 25(5): 125–128
GUO Z L, SHEN A L, KOU C L, et al. Investigation and monitoring on nitrate pollution in groundwater of Henan Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2008, 25(5): 125–128

[15] 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 X H, JIANG L H, LIU Z H, 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

[16] 李文娟, 赵同科, 张成军, 等. 北京市集约化农区地下水硝酸

盐含量变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1445–1450
LI W J, ZHAO T K, ZHANG C J, et al. Nitrate contamination of groundwater under intensive agricultural regions of Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(7): 1445–1450

[17] 余淼, 李瑜. 天津市农区地下水硝酸盐污染现状调查与评价[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 219–222
YU M, LI Y. Investigation and evaluation on nitrate concentration status of groundwater in rural areas of Tianjin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(20): 219–222

[18] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 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): 405–413
LIU H B, LI Z H, ZHANG Y G, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405–413

[19] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 北京市平原农区深层地下水硝态氮污染状况研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 411–418
LIU H B, ZHANG Y G, LI Z H, et al. Nitrate contamination of deep groundwater in rural plain areas of Beijing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 411–418

[20] TANG C, CHEN J, SHEN Y, et al. Long-term effect of wastewater irrigation on nitrate in groundwater in the North China Plain[C]//International Association of Hydrological Sciences. Wastewater Re-use and Groundwater Quality (Proceedings of Symposium HS04). 2004: 34–40

[21] 唐常源, 陈建耀, 宋献方, 等. 农业污水灌溉对石家庄市近郊灌区地下水环境的影响[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 102–108
TANG C Y, CHEN J Y, SONG X F, et al. Effects of wastewater irrigation on groundwater quantity and quality in the suburbs of Shijiazhuang City, China[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 102–108

[22] ZHANG Y, LI F D, ZHANG Q Y, et al. Tracing nitrate pollution sources and transformation in surface- and ground-waters using environmental isotopes[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 213–222

[23] WANG S Q, TANG C Y, SONG X F, et al. Using major ions and $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ to identify nitrate sources and fate in an alluvial aquifer of the Baiyangdian lake watershed, North China Plain[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2013, 15(7): 1430–1443

[24] WANG S Q, TANG C Y, SONG X F, et al. Factors contributing to nitrate contamination in a groundwater recharge area of the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(13): 2271–2285

[25] 赵焕, 王仕琴, 孔晓乐, 等. 华北低山丘陵区潴龙河流域地下水水质特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 17–24
ZHAO H, WANG S Q, KONG X L, et al. A study of the water quality characteristics and factors in the Zhulong River basin in the hilly region of North China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 17–24

[26] 张丽娟, 巨晓棠, 刘辰琛, 等. 北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析——以山东省惠民县为例[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4427–4436
ZHANG L J, JU X T, LIU C C, et al. A study on nitrate contamination of ground water sources in areas of protected vegetables-growing fields — A case study in Huimin County, Shandong Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(21): 4427–4436

[27] HUANG T M, PANG Z H, YUAN L J. Nitrate in groundwater and the unsaturated zone in (semi) arid Northern China: Baseline and factors controlling its transport and fate[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(1): 145–156

[28] 张翠云, 张胜, 李政红, 等. 滹沱河上游区地表水和地下水同位素特征[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 160–164
ZHANG C Y, ZHANG S, LI Z H, et al. Isotopic characteristics of surface water and groundwater in the up-stream of Hutuo River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(5): 160–164

[29] WANG S Q, ZHENG W B, CURRELL M, et al. Relationship between land-use and sources and fate of nitrate in groundwater in a typical recharge area of the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 607–620

[30] WANG S Q, YUAN R Q, TANG C Y, et al. Combination of CFCS and stable isotopes to characterize the mechanism of groundwater-surface water interactions in a headwater basin of the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(11): 1571–1587

[31] 梁慧雅, 翟德勤, 孔晓乐, 等. 府河-白洋淀硝酸盐来源判定及迁移转化规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1236–1244
LIANG H Y, ZHAI D Q, KONG X L, et al. Sources, migration and transformation of nitrate in Fuhe River and Baiyangdian Lake, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agroculture, 2017, 25(8): 1236–1244

[32] 孔晓乐, 王仕琴, 梁慧雅, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2624–2631
KONG X L, WANG S Q, LIANG H Y, et al. Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2624–2631

[33] ZHOU J Y, GU B J, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25088

[34] 李晓欣. 华北平原小麦-玉米两熟制下土壤硝态氮运移及淋失研究[D]. 石家庄: 中国科学院, 2003
LI X X. Leaching loss and movement of nitrate in soil under wheat-corn double cropping system in North China[D]. Shijiazhuang: Chinese Academy of Sciences, 2003

[35] 李晓欣, 胡春胜, 雷玉平, 等. 应用 Geoprobe 对河北栾城土壤硝态氮含量进行计算[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 906–908
LI X X, HU C S, LEI Y P, et al. Calculation for the accumulation of nitrate nitrogen in a Luancheng soil by Geoprobe[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5): 906–908

[36] 巩建华, 柯尊伟, 李季. 河北省藁城市蔬菜种植区化肥施用与地下水硝酸盐污染研究[J]. 农村生态环境, 2004, 20(1): 56–59
GONG J H, KE Z W, LI J. Use of chemical fertilizer and contamination of groundwater in vegetable cultivation area — A case study in Gaocheng City, Hebei Province[J]. Rural Eco-Environment, 2004, 20(1): 56–59

[37] KONG X L, WANG S Q, LIU B X, et al. Impact of water transfer on interaction between surface water and groundwater in the lowland area of North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(13): 2044–2057