

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190444

浅层地下水砷对地表环境变化的响应:研究现状与未来

韦炳干¹, 尹舒慧^{1,2}, 杨林生^{1,2}, 虞江萍¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京 100101;
2.中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100049)

摘要:地下水砷暴露是人类的一大环境健康灾难,地下水砷既受地质因素、地下水文条件和地下水地球化学特征影响,也受地表环境变化影响。综述了农业灌溉、农业用地、气候变化等地表环境变化改变地下水文条件、地下水地球化学性质等引起地下水砷变化的影响机制。基于这些研究成果,提出地下水砷对农业活动的响应机制;着重研究地下水砷时空变化对种植作物类型尤其是物质输入类型,对灌溉模式包括灌溉水源和耕地类型,以及对耕地、园地、林地、草地和水域等农业用地类型的响应机制。地下水砷变化对气候变化的响应方面,着重研究地下水砷的长期变化趋势和影响机制,地下水砷变化对气候变化的时空响应机制,以及地下水砷在未来地表环境变化情景下的时空变化趋势模拟。

关键词:砷;地下水;农业灌溉;农业用地;气候变化

中图分类号:X523:P342

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)03-0001-07

0 引言

地下水按埋藏条件分为浅层和深层地下水,浅层地下水受地表环境的直接影响比深层地下水大,但由于浅层地下水的滞阻作用有限^[1],地表环境变化也会间接影响深层地下水。地球成因的地下水砷污染是地下水安全问题之一,世界有超过2亿人受到地下水砷的威胁,包括阿根廷、智利、墨西哥、美国、孟加拉、印度、越南、中国等^[2-3]。我国高砷地下水主要分布于内蒙古、新疆、山西等,仅暴露于饮水砷含量高于50 $\mu\text{g/L}$ 的人口就超过50万人^[4]。而高砷地下水普遍分布在浅层含水层,孟加拉国高砷地下水广泛出现在浅层含水层,可达10~2300 $\mu\text{g/L}$,对人体健康造成严重影响^[5]。地表环境和浅层地下水联系紧密,地表环境变化影响地下水砷的释放、迁移、转化。地下水砷含量和赋存形态既具有时间变化,也具有空间分布变化^[6-7]。地下水砷时空分布受地质因素、地下水文条件、地下水地球化学特征等影响^[6,8-9]。近年来,地表环境变化如农业灌溉、气

候变化和土地利用变化对地下水砷时空变化的影响特征和影响机制日益受到关注^[10-15]。然而,目前地表环境变化对地下水砷变化的影响主要集中于机理研究,地表环境变化对地下水砷含量和赋存形态影响机制及其时空分布变化方面仍有诸多科学问题亟待研究。

因此,本文综述目前地下水砷变化对气候变化、农业灌溉和农业用地等的响应机制,并分析未来地下水砷时空分布变化对地表环境变化的响应机制。

1 地下水砷对农业活动的响应

1.1 地下水砷对农业灌溉的响应

农业灌溉通过影响地表水文条件、地下水补给特征和地下水地球化学性质等,改变地下水砷含量和赋存形态的变化。目前农业灌溉对地下水中砷迁移转化的影响研究较多^[13-14],但农业灌溉影响下地下水砷的释放与迁移机制仍有不同认识^[16]。

灌溉可通过调节含水层氧化还原条件,促进生物地球化学反应,如Fe/Mn氧化物矿物还原性溶解等引

收稿日期:2020-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41977400,41601559)

作者简介:韦炳干(1982—),男,广西大化人,副研究员,主要研究方向为环境地理与人类健康。E-mail: weibg@igsnr.ac.cn

通信作者:杨林生(1966—),男,河南唐河人,研究员,主要研究方向为环境地理与人类健康。E-mail: yangls@igsnr.ac.cn

起砷向地下水中迁移与富集^[10,17-18]。地表水灌溉增加入渗量,抬升地下水位,地下水位变化引起地下水化学成分、氧化还原环境及微生物的作用强度等发生明显变化,影响砷在地下水系统中的释放、迁移和转化^[10,19-21]。灌溉期地下水位上升导致含水层的溶解氧含量降低,还原性增强,促进砷的还原性溶解,使得水砷含量上升^[22-24]。当水位升高到原来沉积物氧化还原转换界面以上,砷进入地下水后被还原为亚砷酸盐;部分砷与黄铁矿和菱铁矿形成共沉淀,地下水溶解砷的浓度降低,导致接近地下水位的水砷浓度最高^[10,25]。周期性的灌溉回水导致近地表含水层氧化还原条件周期性波动,周期氧化还原交替导致砷活化,并在地下水富集,导致地下水砷含量增高^[10]。灌溉期铁氧化物/氢氧化物的还原和铁硫化物的氧化促进砷的释放,而非灌溉期,Fe(III)SO₄²⁻还原固定砷,这个过程使得地下水砷浓度发生变化^[18]。

灌溉水携带外源物质进入地下水可引起地下水砷变化。灌溉补给期氧气进入地下水,Fe(III)氧化物/氢氧化物形成,硫氧化物氧化溶解释放出砷,砷被Fe(III)氧化物/氢氧化物吸附并发生沉淀;还原条件使铁氧化物溶解并释放砷,随补给水输入地下水^[26]。稻田、池塘、河流等的溶解性有机碳可随灌溉水进入地下水,增强地下含水层中微生物对砷的还原作用,导致砷向地下水释放,增加地下水砷浓度^[27-28]。SO₄²⁻和NO₃⁻等离子输入地下水,影响地下水砷的氧化还原反应,从而影响地下水砷浓度及分布^[29-30]。

灌溉可以促进地下水垂直流动,灌溉回水的快速冲刷淋洗导致固相可溶态砷释放,影响地下水砷的变化^[10,12,18]。灌溉间歇期,地下水位降低会导致近地表环境氧化条件增强,砷以固相为主、并与铁-氧-氟化物共沉淀或吸附,导致地下水砷浓度降低;灌溉期,地下水位上升,还原条件增强,铁-氧-氟化物的还原性溶解释放砷,并随垂直补给流进入较深水层^[11-12]。

灌溉水源可影响地下水砷变化。抽取地下水灌溉使砷被带到地表,部分砷累积于表土,还原条件下随垂直渗透补给水输送到含水层中释放^[6]。封闭的蒸发盆地地下水抽取增加地下水蒸发率,蒸发浓缩使得地下水砷的浓度升高^[31]。地下水抽取通过影响地下水位波动从而改变地下水砷的含量^[32-33]。过度抽水的压力增加垂直水力梯度,导致存在于含水层中粘土层的孔隙水砷释放进入地下水,增加地下水砷浓度^[34]。过度开采地下水可降低深层地下水水位,增大浅层地下水与深

层地下水之间的水力梯度,使地表或浅层沉积物来源的溶解有机碳等被输送到更深水层^[35-37]。抽水可促进大气中的氧气进入含水层,改变氧化还原条件,增加砷从硫氧化物中释放到地下水的速率^[38];补给水源的迁移可导致更多溶解有机物进入地下水,促进微生物介导的砷还原过程^[39]。内蒙古河套盆地西部地下水补给源从山前地表水向湖泊水体迁移,可向含水层输入较多不稳定的溶解有机质,促进细菌对硫酸盐的还原,对Fe(III)氧化物的异化氧化,诱导含砷铁(III)氢氧化物还原,导致砷释放进入地下水^[39]。

1.2 地下水砷对农业用地的响应

农业用地方式改变水文状况、生物地球化学条件以及砷源物质,并对地下水砷浓度产生较大影响^[15,40](见表1)。

大量挖掘池塘、发展地下水灌溉的稻田改变含水层的地球化学输入和地下水流动模式^[15,41]。池塘缺氧沉积物中的生物可降解有机碳随池塘补给进入含水层,促进磁铁矿还原、砷解吸、黑云母风化和磷灰石溶解等多种生物地球化学途径,向地下水释放砷,导致地下水砷含量升高^[15]。稻田是含水层最大的水源之一,补给到含水层的水从稻田表面流过,导致砷沉积在表层土壤上,使得灌溉水中的砷降低,减少了外源砷进入地下水;稻田回灌水主要含难降解有机碳,限制地下水沉积物中砷的还原溶解,所以稻田水补给导致地下水砷含量降低^[41-43]。

旱田与水田对地下水砷变化的影响也具有差异性。曹永生等^[44]发现银川平原北部旱田区地下水砷浓度较高,这是因为水田区采用连续灌溉种植水稻,对地下水中砷的浓度起到一定的稀释作用,但其携带溶解氧、有机物等进入地下水,有机物氧化可使含水层处于还原状态,促进砷释放。施用更大量磷肥的旱田区土壤中残留较高浓度的磷酸盐随灌溉水淋滤进入地下水,磷酸盐的竞争吸附导致吸附在矿物质表面的砷向地下水释放,使地下水砷浓度升高^[44-45]。

养殖场是地下水砷的污染源之一,刘春华等^[46]发现黄河下游鲁北平原部分浅层地下水砷污染源于养殖场砷污染,刘雅慈等^[47]也指出养鸡场的鸡粪堆积导致周边地下水砷的含量增加。洛克沙肿(3-硝基-4-羟基苯砷酸)被广泛用作饲料添加剂,进入畜禽体内的砷大部分随粪便以原体形式排放进入环境,在微生物和光照作用下洛克沙肿转化为毒性较强的三价和五价无机砷等,随降水或灌溉水的淋滤进入地下水^[46-48]。

表1 地下水砷对农业活动的响应研究现状

Table 1 The research status of arsenic in groundwater response to agricultural activities

农业活动	对地下水砷变化作用机理	研究区域	文献
农业灌溉	地下水位波动、氧化还原条件变化,促进砷的还原性溶解或吸附	河套平原、江汉平原、大同盆地、美国爱达荷州、蛇河平原、孟加拉国、印度	Zhang 等 ^[19] ;严怡君等 ^[24] ;甘义群等 ^[23] ;Xie 等 ^[18] ;Oinam 等 ^[20] ;Busbee 等 ^[10] ;Dhar 等 ^[21] ;Aggarwal 等 ^[17]
	O ₂ 输入,促进硫化物氧化溶解,释放砷	孟加拉国	Polizzotto 等 ^[40]
	溶解性有机碳输入,增强微生物对砷的还原作用	孟加拉国、恒河三角洲、湄公河三角洲	Neumann 等 ^[15] ;Kocar 等 ^[28] ;Aggarwal 等 ^[17] ;Harvey 等 ^[27]
	SO ₄ ²⁻ 和 NO ₃ ⁻ 等输入,影响砷的氧化还原作用	大同盆地、湄公河三角洲、孟加拉三角洲、红河三角洲	Xie 等 ^[30] ;Buschmann 等 ^[29]
地下水抽取	灌溉回水冲刷淋洗,促进固相可溶态砷释放	美国蛇河平原、巴基斯坦、大同盆地	Ali 等 ^[12] ;Xie 等 ^[11] ;Busbee 等 ^[10]
	砷随补给水垂直渗透输入含水层	美国新罕布什尔州	Harte 等 ^[6]
	溶解物质的蒸发浓缩,水砷含量增高	巴基斯坦、克罗地亚	Tabassum 等 ^[32] ;Romic 等 ^[33] ;Nickson 等 ^[31]
	孔隙水砷抽出、释放进入地下水	美国加利福尼亚州	Smith 等 ^[34]
	地下水位下降、氧化环境促进砷从硫化物释放进入地下水	法国阿尔卑斯山脉	Pili 等 ^[38]
	水力梯度增大、DOC 输入,促进增强微生物对砷的还原作用	湄公河三角洲、孟加拉国、孟加拉三角洲	Stuckey 等 ^[35] ;Farooq 等 ^[37] ;Harvey 等 ^[36]
池塘	砷随地下水补给水源迁移,促进水砷含量变化	内蒙古河套平原	Zhang 等 ^[19]
	生物可降解有机碳输入,促进砷释放的生物地球化学过程	孟加拉国、柬埔寨	Neumann 等 ^[42-43]
	限制有机碳输入	柬埔寨、孟加拉国	Neumann 等 ^[42-43]
稻田/水田	稀释作用、溶解氧和有机物输入	银川平原	曹永生等 ^[44]
	磷酸盐输入,发生竞争吸附,矿物质表面砷释放	银川平原	曹永生等 ^[44]
养殖场	外源砷的输入,水砷含量增高	鲁北平原	刘春华等 ^[46] ;刘慈雅等 ^[47]

2 地下水砷对气候变化的响应

2.1 地下水砷对季节变化的响应

地下水砷含量和赋存形态具有明显的季节变化特征^[33,49](见表2)。地下水砷含量的季节差异与降水量变化相关,降水量大的季节地下水砷含量较低,而降水量小的季节地下水砷含量较高^[50]。雨季可迅速抬升地下水位,含水层还原性增强,有利于 As^V 转化成 As^{III};雨季过后地下水位逐渐降低,地下水中 As^{III} 含量比例也逐渐降低^[50-51]。内蒙古呼和浩特地区地下水总砷和 As^{III} 含量在枯水期和丰水期之间差异明显^[52]。雨季富含 O₂ 的地表水补给氧化地下水的 Fe²⁺ 和 As^{III}, 导致地下水砷浓度降低;旱季含水层无 O₂ 输入,恢复到无氧环境,砷浓度升高^[53]。地下水砷含量和赋存形态的季节变化除了受到区域地质背景、基岩特性和水文地质等自然因素影响外^[54-56],还受到降水特征、水位波动、地下水补给和水文地球化学性质等的影响。以降水补给为主的地下水,降水变化对地下水位变化影响较大^[57]。降水量减少,降低地下水位,稀释作用减小,地下水砷的浓度可能增加^[37]。旱季地下水位下降使得砷的氧化作用

增强,水中游离的 O₂ 使黄铁矿、白铁矿和砷黄铁矿易于被氧化,提高原生矿物和硫化物溶解度,促进砷的释放,增加地下水 As^V 浓度;雨季地下水位上升,有利于砷的还原溶解,但是由于降水量增大,地下水流对砷的稀释程度也增大^[58]。此外,降雨量增大可增加含水层水力梯度,促进砷向浅层地下水释放^[59]。

季节变化通过影响水文特征和水文地球化学性质引起地下水砷含量变化的机理较为清楚,但地下水砷的季节变化规律研究结果仍存在较多不一致性,需进一步开展季节变化与地下水砷变化相互作用关系研究。

2.2 地下水砷对极端气候的响应

IPCC 指出全球变暖将会持续,湿润区和干旱区乃至湿润季节和干旱季节蒸发的反差也会增加,极端降水事件频发可能延长极端干旱期^[60]。地下水的补给特征受气候变化影响而改变,导致地下水位波动和水温变化等,使得地下水砷发生变化^[61]。极端气候事件如长期干旱使地下水位急剧下降,还原溶解和碱性解吸增强,地下水砷的含量增加;极端降水使地下水受富氧

水的快速稀释,地下水砷含量降低^[62]。气候变化引起的灌溉增加及土地利用变化可间接影响地下水砷的运移,长期干旱可能导致砷浓度增加^[14,57,59,63]。气候变化导致夏末干旱频发,地表水越来越少,灌溉需水量大大增加,地下水抽取可能会增加,为地下水砷的运移提供更有利的水文条件^[14,61]。气候变化可能造成地下水温度升高,降低地下水溶解氧浓度和氧化还原电位,影响砷的迁移转化,造成地下水砷时空分布变化^[64]。

干燥期延长使蒸发强度增大,导致地下水砷浓缩富集;温度升高增加水分蒸发,并可能产生更强烈的降雨,冲刷效应可能导致更多固相可溶态砷释放^[65]。干旱条件下,黄铁矿进入非饱和带,导致其氧化溶解作用增强,从而促进砷释放,因此欧洲 2005~2011 年期间地下水砷浓度的增加可能与 2003 年夏季和 2004 年冬季的干旱相关^[38]。

3 地下水砷对地表环境变化响应的研究领域

地下水砷变化对农业活动响应的研究主要集中于农业灌溉和农业用地类型,因此地下水砷对农业活动时空变化的响应可从以下三个方面进行深入研究。

(1)地下水砷时空变化对种植作物类型的响应研究。不同种植作物类型的物质输入有较大差异,开展不同种植作物类型的物质输入如输入肥料类型与地下水系统各物质之间的相互作用机制,研究这些物质间的相互作用对地下水系统中砷的释放或沉淀影响规律,并研究地下水砷时空变化对不同种植作物空间分布的响应机制;地下水砷在耕作期和非耕作期等不同时期

的时间变化机制。

(2)地下水砷变化对灌溉模式的响应研究。不同耕作系统尤其是淹水耕作系统和旱地耕作系统的灌溉水源、灌溉水量等可影响地下水砷变化,着重开展地下水灌溉和地表水灌溉对地下水砷变化的影响机制研究;对比研究旱地和淹水耕作系统的灌溉模式对地下水水文条件、地下水地球化学性质的影响,开展旱地耕作系统与淹水耕作系统灌溉对地下水砷变化的影响机制研究;研究两种耕作系统中砷在地下水-土壤-作物、地表水-土壤-作物-地下水之间的迁移转化规律与影响机制,深入研究其对地下水砷变化的影响机制。

(3)地下水砷变化对农业用地类型的响应机制研究。着重开展耕地、园地、林地、草地和水域等农业用地类型对地下水砷变化的影响机制;研究地下水空间分布变化对农业用地类型空间分布的响应机制。

而地下水砷变化对气候变化的响应机制研究以季节变化为主,可从以下三个方面进行深入研究。

(1)地下水砷长期变化机制研究。通过长期监测数据,分析地下水砷的短期变化和长期变化规律,研究地下水砷的长期变化趋势和影响机制。

(2)地下水砷变化对气候变化的响应机制研究。研究气候因子对地下水文条件、地下水地球化学性质、地下水微生物群落影响,进而研究气候变化对地下水砷含量与赋存形态的影响;着重研究地下水砷时空变化对极端气候事件、长期气候变化和大尺度气候变化的响应机制;进一步研究地下水砷含量和赋存形态的时空分布变化规律与影响机制,发展模型模拟未来地

表2 地下水砷对气候变化响应研究现状

Table2 The research status of arsenic in groundwater response to climate change

气候因素	对地下水砷变化作用机理	研究区域	文献
季节变化	雨季地下水位升高、还原性增强,利于砷还原性溶解;雨季后,氧化性增强,利于砷吸附	孟加拉国、墨西哥、江汉平原、内蒙古	Yadav 等 ^[49] ;Rodriguez 等 ^[50] ;韦炳干等 ^[52] ;邓亚敏等 ^[51] ;廖梓龙等 ^[58]
	雨季 O ₂ 输入,氧化性增强;旱季还原性增强,水砷含量增高	江汉平原	Schaefer 等 ^[53]
降水	降水稀释作用,水砷含量下降	孟加拉三角洲、包头市	廖梓龙等 ^[58] ;Farooq 等 ^[57]
	降水增加含水层水力梯度,促进砷向浅层地下水迁移	墨西哥	Rodriguez 等 ^[50]
干旱	地下水位下降,砷的还原溶解和碱性解吸增强	东南亚	Fendorf 等 ^[62]
	蒸发强度增大,砷浓缩富集,水砷含量增高	瑞士	Figura 等 ^[64]
	黄铁矿输入、氧化溶解作用增强,促进砷释放	法国阿尔卑斯山脉	Pili 等 ^[38]
极端降水	富氧水输入与稀释作用,水砷含量降低	东南亚	Fendorf 等 ^[38]
地表温度	气温升高,水分蒸发增强,降水、冲刷效应促进固相可溶态砷释放	瑞士	Figura 等 ^[64]
地下水温	水温升高,溶解氧浓度降低,还原性增强,促进砷的迁移转化	美国	Nordstrom ^[65]

表环境变化情景下地下水砷时空变化趋势。

参考文献:

- [1] Burgess W G, Hoque M A, Michael H A, et al. Vulnerability of deep groundwater in the Bengal aquifer system to contamination by arsenic [J]. *Nature Geoscience*, 2010,3(2):83–87.
- [2] Taylor R G, Scanlon B, Döll P, et al. Ground water and climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(4):322–329.
- [3] Nordstrom D K. Worldwide occurrences of arsenic in ground water [J]. *Science*, 2013,296:2143–2145.
- [4] Rodríguez-Lado L, Sun G, Berg M, et al. Groundwater arsenic contamination throughout China [J]. *Science*, 2013,341:866–868.
- [5] Hasan M A, Ahmed K M, Sracek O, et al. Arsenic in shallow groundwater of Bangladesh: investigations from three different physiographic settings [J]. *Hydrogeology Journal*, 2007,15(8):1507–1522.
- [6] Harte P T, Ayotte J D, Hoffman A, et al. Heterogeneous redox conditions, arsenic mobility, and groundwater flow in a fractured–rock aquifer near a waste repository site in New Hampshire, USA [J]. *Hydrogeology Journal*, 2012,20:1189–1201.
- [7] O’Shea B, Stransky M, Leitheiser S, et al. Heterogeneous arsenic enrichment in meta–sedimentary rocks in central Maine, United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2015,505:1308–1319.
- [8] Moncur M C, Paktunc D, Jean Birks S, et al. Source and distribution of naturally occurring arsenic in groundwater from Alberta’s southern oil sands regions [J]. *Applied Geochemistry*, 2015,62:171–185.
- [9] Smedley P L, Knudsen J, Maiga D. Arsenic in groundwater from mineralised Proterozoic basement rocks of Burkina Faso [J]. *Applied Geochemistry*, 2007,22(5):1074–1092.
- [10] Busbee M W, Kocar B D, Benner S G. Irrigation produces elevated arsenic in the underlying groundwater of a semi–arid basin in Southwestern Idaho [J]. *Applied Geochemistry*, 2009,24(5):843–859.
- [11] Xie X, Wang Y, Li J, et al. Effect of irrigation on Fe(III)– SO_4^{2-} redox cycling and arsenic mobilization in shallow groundwater from the Datong basin, China: evidence from hydrochemical monitoring and modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2015,523:128–138.
- [12] Ali W, Mushtaq N, Javed T, et al. Vertical mixing with return irrigation water the cause of arsenic enrichment in groundwater of district Larkana Sindh, Pakistan [J]. *Environmental Pollution*, 2019,245:77–88.
- [13] Kleve B, Ala–Aho P, Bertrand G, et al. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,518:250–266.
- [14] Van Roosmalen L, Sonnenborg T O, Jensen K H. Impact of climate and land use change on the hydrology of a large–scale agricultural catchment [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7).
- [15] Neumann R B, Badruzzaman A B M, Shoemaker J K, et al. Anthropogenic influences on groundwater arsenic concentrations in Bangladesh [J]. *Nature Geoscience*, 2010,3(1):46–52.
- [16] 严怡君. 灌溉活动影响下非饱和带砷迁移转化规律研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. (YAN Yijun. Study on Arsenic Migration and Transformation in the Unsaturated Zone under the Influence of Irrigation [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [17] Aggarwal P K, Basu A R, Kulkarni K M. Comment on ‘arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh’ (I) [J]. *Science (New York)*, 2003,300(5619):584.
- [18] Xie X, Wang Y, Su C, et al. Influence of irrigation practices on arsenic mobilization: evidence from isotope composition and Cl/Br ratios in groundwater from Datong basin, northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,424:37–47.
- [19] Zhang Z, Guo H, Zhao W, et al. Influences of groundwater extraction on flow dynamics and arsenic levels in the western Hetao Basin, Inner Mongolia, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018,26(5S1):1499–1512.
- [20] Oinam J D, Ramanathan A, Linda A, et al. A study of arsenic, iron and other dissolved ion variations in the groundwater of Bishnupur District, Manipur, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011,62(6):1183–1195.
- [21] Dhar R K, Zheng Y, Stute M, et al. Temporal variability of groundwater chemistry in shallow and deep aquifers of Araihaazar, Bangladesh [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008,99(1):97–111.
- [22] Guo H, Zhang Y, Jia Y, et al. Dynamic behaviors of water levels and arsenic concentration in shallow groundwater from the Hetao basin, Inner Mongolia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013,135:130–140.
- [23] 甘义群, 王焰新, 段艳华, 等. 江汉平原高砷地下水监测场砷的动态变化特征分析[J]. *地学前缘*, 2014,21(4):37–49. (GAN Yiqun, WANG Yanxin, DUAN Yanhua, et al. Dynamic changes of groundwater arsenic concentration in the monitoring field site, Jianghan Plain [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014,21(4):37–49. (in Chinese))
- [24] 严怡君, 谢先军, 郑文君, 等. 灌溉活动对大同盆地表层土壤中砷迁移的影响[J]. *地质科技情报*, 2017,36(3):235–241. (YAN Yijun, XIE Xianjun, ZHENG Wenjun, et al. Influence of practices on arsenic mobilization in near–surface soil of Datong basin, Northern China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017,36(3):235–241. (in Chinese))
- [25] 郭华明, 郭琦, 贾永锋, 等. 中国不同区域高砷地下水化学特征及形成过程[J]. *地球科学与环境学报*, 2013,35(3):83–96. (GUO Huaming, GUO Qi, JIA Yongfeng, et al. Chemical characteristics and geochemical processes of high arsenic groundwater in different regions of China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013,35(3):83–96. (in Chinese))
- [26] Polizzotto M L, Harvey C F, Li G, et al. Solid–phases and desorption processes of arsenic within Bangladesh sediments [J]. *Chemical Geology*, 2006,228(1):97–111.
- [27] Harvey C F, Swartz C H, Badruzzaman A, et al. Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh [J]. *Science*, 2002,298(5598):1602–1606.

- [28] Kocar B D, Polizzotto M L, Benner S G, et al. Integrated biogeochemical and hydrologic processes driving arsenic release from shallow sediments to groundwaters of the Mekong delta [J]. *Applied Geochemistry*, 2008,23(11):3059–3071.
- [29] Buschmann J, Berg M. Impact of sulfate reduction on the scale of arsenic contamination in groundwater of the Mekong, Bengal and Red River deltas [J]. *Applied Geochemistry*, 2009,24(7):1278–1286.
- [30] Xie X, Ellis A, Wang Y, et al. Geochemistry of redox-sensitive elements and sulfur isotopes in the high arsenic groundwater system of Datong basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009,407(12):3823–3835.
- [31] Nickson R T, McArthur J M, Shrestha B, et al. Arsenic and other drinking water quality issues, Muzaffargarh District, Pakistan [J]. *Applied Geochemistry*, 2005,20(1):55–68.
- [32] Tabassum R A, Shahid M, Dumat C, et al. Health risk assessment of drinking arsenic-containing groundwater in Hasilpur, Pakistan: effect of sampling area, depth, and source [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(20):20018–20029.
- [33] Romić Z, Habuda-Stanić M, Kalajdžić B, et al. Arsenic distribution, concentration and speciation in groundwater of the Osijek area, eastern Croatia [J]. *Applied Geochemistry*, 2011,26(1):37–44.
- [34] Smith R, Knight R, Fendorf S. Overpumping leads to California groundwater arsenic threat [J]. *Nature Communications*, 2018,9(1):2089.
- [35] Stuckey J W, Schaefer M V, Kocar B D, et al. Arsenic release metabolically limited to permanently water-saturated soil in Mekong Delta [J]. *Nature Geoscience*, 2016,9(1):70–76.
- [36] Harvey C F, Ashfaq K N, Yu W, et al. Groundwater dynamics and arsenic contamination in Bangladesh [J]. *Chemical Geology*, 2006,228(1–3):112–136.
- [37] Farooq S H, Chandrasekhar D, Berner Z, et al. Influence of traditional agricultural practices on mobilization of arsenic from sediments to groundwater in Bengal delta [J]. *Water Research*, 2010,44(19):5575–5588.
- [38] Pili E, Tisserand D, Bureau S. Origin, mobility, and temporal evolution of arsenic from a low-contamination catchment in Alpine crystalline rocks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013,262:887–895.
- [39] Zhang Z, Guo H, Zhao W, et al. Influences of groundwater extraction on flow dynamics and arsenic levels in the western Hetao basin, Inner Mongolia, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018,26(5):1499–1512.
- [40] Polizzotto M L, Kocar B D, Benner S G, et al. Near-surface wetland sediments as a source of arsenic release to ground water in Asia [J]. *Nature*, 2008,454(7203):505–508.
- [41] Lawson M, Polya D A, Boyce A J, et al. Tracing organic matter composition and distribution and its role on arsenic release in shallow Cambodian groundwaters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016,178:160–177.
- [42] Neumann R B, Polizzotto M L, Badruzzaman A B M, et al. Hydrology of a groundwater-irrigated rice field in Bangladesh: seasonal and daily mechanisms of infiltration [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(9):1–14.
- [43] Neumann R B, St Vincent A P, Roberts L C, et al. Rice field geochemistry and hydrology: An explanation for why groundwater irrigated fields in Bangladesh are net sinks of arsenic from groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011,45(6):2072–2078.
- [44] 曹永生, 郭华明, 倪萍, 等. 沉积物地球化学特征和土地利用方式对地下水砷行为的影响[J]. *地学前缘*, 2017,24(2):274–285. (CAO Yongsheng, GUO Huaming, NI Ping, et al. Influences of sediments geochemical characteristics and land utilization on groundwater arsenic activities [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017,24(2): 274–285. (in Chinese))
- [45] 王芳, 李友宏, 赵天成, 等. 宁夏引黄灌区灌淤土壤磷累积状况及磷肥肥效研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011,29(2):105–109. (WANG Fang, LI Youhong, ZHAO Tiancheng, et al. Dynamic of phosphorus accumulation in anthropogenic-alluvial soil of Yellow River irrigation area in Ningxia [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011,29(2):105–109. (in Chinese))
- [46] 刘春华, 张光辉, 杨丽芝, 等. 黄河下游鲁北平原地下水砷浓度空间变异特征与成因[J]. *地球学报*, 2013,34(4):470–476. (LIU Chunhua, ZHANG Guanghui, YANG Lizhi, et al. Variation characteristics and causes of arsenic concentration in shallow groundwater of northern Shandong Plain in the lower reaches of the Yellow River [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013,34(4):470–476. (in Chinese))
- [47] 刘雅慈, 李亚松, 张兆吉, 等. 鲁北平原养鸡场周边包气带与地下水砷化合物分布规律[J]. *南水北调与水利科技*, 2017,15(3):86–93. (LIU Yaci, LI Yasong, ZHANG Zhaoji, et al. Distribution of arsenic compounds in vadose zone and groundwater around the chicken farm in Lubei plain [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017,15(3):86–93. (in Chinese))
- [48] 王克俭, 廖新佛. 猪场周围环境中砷的分布及迁移规律研究[J]. *家畜生态学报*, 2005,26(2):29–32. (WANG Kejian, LIAO Xindi. Study on the distribution and migrating disciplinavian of arsenic around the pig farm [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2005,26(2):29–32. (in Chinese))
- [49] Yadav I C, Devi N L, Singh S. Spatial and temporal variation in arsenic in the groundwater of upstream of Ganges River basin, Nepal [J]. *Environmental Earth Science*, 2015,73:1265–1279.
- [50] Rodriguez R, Ramos J A, Armienta A. Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall [J]. *Applied Geochemistry*, 2004,19(2):245–250.
- [51] 邓娅敏, 王焰新, 李慧娟, 等. 江汉平原砷中毒病区地下水砷形态季节性变化特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015,40(11):1876–1886. (DENG Yamin, WANG Yanxin, LI Huijuan, et al. Seasonal variation of arsenic speciation in shallow ground water from endemic arsenicosis area in Jianghan plain [J]. *Earth Science (Journal of China University of GeoSciences)*, 2015,40(11):1876–1886. (in Chinese))

- [52] 韦炳干, 高健伟, 柴园庆, 等. 饮水型砷中毒病区人群砷暴露量及尿砷的季节变化[J]. 生态毒理学报, 2016,11(4):204–210. (WEI Binggan, GAO Jianwei, CHAI Yuanqing, et al. Seasonal variations of arsenic in drinking water and urine for exposed population from an endemic arsenism region [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016,11(4):204–210. (in Chinese))
- [53] Schaefer M V, Ying S C, Benner S G, et al. Aquifer arsenic cycling induced by seasonal hydrologic changes within the Yangtze River basin [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(7):3521–3529.
- [54] Farooq S H, Chandrasekharam D, Norra S, et al. Temporal variations in arsenic concentration in the groundwater of Murshidabad District, West Bengal, India [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011,62(2):223–232.
- [55] Ormachea Muñoz M, Wern H, Johnsson F, et al. Geogenic arsenic and other trace elements in the shallow hydrogeologic system of southern Poopó basin, Bolivian Altiplano [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013,262:924–940.
- [56] Brikowski T H, Neku A, Shrestha S D, et al. Hydrologic control of temporal variability in groundwater arsenic on the Ganges floodplain of Nepal [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,518:342–353.
- [57] Bondu R, Cloutier V, Rosa E, et al. A review and evaluation of the impacts of climate change on geogenic arsenic in groundwater from fractured bedrock aquifers [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2016,227:296–309.
- [58] 廖梓龙, 龙胤慧, 刘华琳, 等. 气候变化与人类活动对包头市地下水位的影响[J]. 干旱区研究, 2014,31(1):138–143. (LIAO Zilong, LONG Yinhui, LIU Hualin, et al. Influence of climate change and human activities on groundwater level in Baotou City [J]. *Arid Zone Research*, 2014,31(1):138–143. (in Chinese))
- [59] Rodriguez R, Ramos J A, Armienta A. Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall [J]. *Applied Geochemistry*, 2004,19(2):245–250.
- [60] D Qin, G K Plattner, M Tignor, et al. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014:159–254.
- [61] Green T R, Taniguchi M, Kooi H, et al. Beneath the surface of global change: impacts of climate change on groundwater [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,405(3):532–560.
- [62] Fendorf S, Michael H A, Van Geen A. Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in south and southeast Asia [J]. *Science*, 2010,328(5982):1123–1127.
- [63] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. *Applied Geochemistry*, 2002,17(5):517–568.
- [64] Figura S, Livingstone D M, Hoehn E, et al. Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011,38:1–5.
- [65] Nordstrom D K. Acid rock drainage and climate change [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009,100:97–104.

Response of Arsenic in Shallow Groundwater to the Changes of Surface Environment: Research Status and Perspectives

WEI Binggan¹, YIN Shuhui^{1,2}, YANG Linsheng^{1,2}, YU Jiangping¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Exposure to arsenic in drinking groundwater is one of greatest environmental health disaster for mankind. Arsenic in groundwater is not only affected by geogenic factors, hydrological condition and geochemical characteristics of groundwater, but also influenced by surface environmental changes such as agricultural irrigation, agricultural land and climate changes. This paper comprehensively reviewed the literature and evaluated the scientific knowledge on the mechanisms of surface environmental changes, including agricultural irrigation, agricultural land utilization and climate change, impacted on the changes of arsenic in groundwater. According to the research status, the additional research areas in future were identified. The response mechanisms of arsenic in groundwater on agricultural activities could be concerned on the responding mechanisms of spatial and temporal changes of groundwater arsenic to plant crop types especially material input types, irrigation mode including irrigation water source and cultivated land type, and agricultural land types such as cultivated land, garden land, woodland, grassland and water area. The response mechanisms of arsenic in groundwater on climate change could be focused on the long-term changing trend and influencing mechanism of arsenic in groundwater, temporal and spatial responding mechanism of arsenic in groundwater to climate change, and the simulation of the changes about temporal and spatial distributions of arsenic in groundwater under different future surface environmental scenario.

Key words: arsenic; groundwater; agricultural irrigation; land utilization; climate change