

王焰新,杜尧,邓娅敏,等.湖底地下水排泄与湖泊水质演化[J].地质科技通报,2022,41(1):1-10.

Wang Yanxin, Du Yao, Deng Yamin, et al. Lacustrine groundwater discharge and lake water quality evolution[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 1-10.

湖底地下水排泄与湖泊水质演化

王焰新¹, 杜尧¹, 邓娅敏¹, 甘义群¹, 王沛芳², 马腾¹, 史建波^{1,3}, 谢先军¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078; 2. 河海大学环境学院, 南京 210024;

3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:湖泊富营养化是当前全球范围内最为典型且严重的水环境问题之一,但过去偏重营养盐向湖泊的点源和面源输入评价,常常忽视地表水—地下水相互作用在湖泊水质形成与演化中的作用。总结了地下水—湖水相互作用模式,重点评述了地下水排泄过程对湖泊水文与水质影响的研究进展,对比了渗流仪测量、水量平衡、氮质量平衡、温度示踪、数值模拟等量化方法的优劣性与适用性,探讨了地下水向湖泊排泄的时空变异性、地下水—湖水界面氮磷的迁移转化等难点问题的研究现状,提出该领域未来研究方向主要包括:综合运用多种技术方法,表征湖底地下水排泄的时空变异性;揭示界面水文生物地球化学过程,量化地下水向湖泊排泄氮磷负荷;评估强烈人类活动改造对地下水—湖水相互作用的影响。

关键词:地下水排泄;湖泊;氮;磷;界面

中图分类号:P641 文章编号:2096-8523(2022)01-0001-10 收稿日期:2021-11-30

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Lacustrine groundwater discharge and lake water quality evolution

Wang Yanxin¹, Du Yao¹, Deng Yamin¹, Gan Yiqun¹,

Wang Peifang², Ma Teng¹, Shi Jianbo^{1,3}, Xie Xianjun¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430078, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Lake eutrophication is one of the most typical and serious water environmental problems in the world, and input of both point-source and non-point source nutrients into lake has been the focus of previous studies. However, the role of surface water-groundwater interactions in the occurrence and evolution of lake eutrophication has been often neglected. In this paper, the patterns of groundwater-lake water interactions were summarized, the research progress on the influence of groundwater discharge on the hydrology and water quality of lake were reviewed, and the advantages and applicability of different quantifying methods such as seepage meter measurement, water balance, radon mass balance, temperature tracing, and numerical simulation) were compared. The state-of-art of the studies and major challenges in understanding the spatial-temporal variability of groundwater discharge to lakes, and the transport and transformation of nitrogen and phosphorus at the groundwater-lake interface were reviewed. And three directions for the future study in this field were proposed: 1) characterizing the spatial-temporal variability of lacustrine groundwater discharge using multiple methods; 2) accurately quantifying the loads of nitrogen and phos-

基金项目: 国家自然科学基金项目(42020104005;U21A2026)

作者简介: 王焰新(1963—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事水文地质、环境地质领域的教学和科研工作。

E-mail:yx.wang@cug.edu.cn

phorus with groundwater discharge into lakes, on the basis of revealing hydrobiogeochemical processes at the interface; and 3) unraveling the effect of strong anthropogenic activities on groundwater-lake interactions.

Key words: groundwater discharge; lake; nitrogen; phosphorus; interface

由于过量的氮、磷输入,湖泊富营养化已成为当前全球普遍存在、十分严重的生态环境问题,不仅导致水生生态系统失衡,还直接威胁以湖泊等作为集中供水水源的水质安全。通常认为,湖泊中高负荷的氮、磷主要源于人类活动污染的河流沟渠等点源输入或农业活动的面源输入。相对于营养盐向湖泊的点源和面源输入,地下水的影响难以直接观测,因而其对湖泊富营养化的贡献长期以来被严重忽视^[1-4]。如何精细表征地下水—湖水相互作用,定量评价地下水对湖泊富营养化的贡献,成为湖泊污染防治与生态修复亟待解决的关键问题。

随着观测手段和探测技术的发展,地下水向湖泊输入氮磷对湖泊富营养的贡献研究在 21 世纪初才逐步在欧洲开展,2010 年以后逐渐成为水环境领域的前沿和热点^[5]。近年来在德国、丹麦、荷兰、加拿大、柬埔寨和我国青藏高原、洞庭湖、鄱阳湖等区域的调查和监测研究,陆续发现地下水是湖泊氮磷输入的重要来源,通过地下水排泄输入湖泊的氮磷负荷在湖泊富营养化防治中不容忽视^[1,3,6-10]。当前,世界范围内许多湖泊污染控制不力、治理成效不佳的主要原因,可能与未考虑地下水排泄对湖泊氮磷输入的贡献有关。

地下水向湖泊排泄的水文通量量化是湖泊—地下水相互作用研究的基础,也是评估地下水对湖泊氮磷贡献的重要前提。然而,受地下水与湖水位的季节性与年际动态变化,以及湖区地形地貌、水文、水文地质、湖底岩性等空间变化的影响,地下水排泄呈现高度的时空变异性特征^[11-14],这成为地下水向湖泊排泄量化研究的难点。

地下水向湖泊排泄输入氮、磷负荷受以下因素控制:①含水层中氮、磷的来源和主要赋存形态;②湖底地下水水流速度对反应速率和滞留时间的影

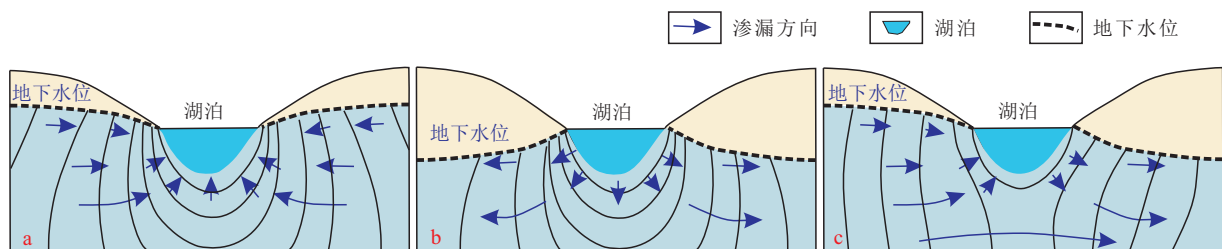
响;③地下水—湖泊交互界面上地球化学梯度控制氮、磷的形态转化,从而影响氮和磷的衰减与释放。氮磷在交互带的界面过程不仅影响地下水输入湖泊的营养盐负荷,还会改变 N/P 比值,对局部热区的藻类爆发具有重要影响。目前已有研究大多通过地下水中氮磷浓度乘以水文通量得到地下水排泄氮磷输入负荷,弱化了地下水中氮磷分布的时空变异性,复杂界面过程的刻画,导致地下水排泄输入湖泊的氮磷负荷评估不准确^[15-16],难以有效预测和安全管控湖泊水环境状况。

针对地下水在湖泊水质演化中的作用被忽视的现状,本文系统评述了地下水—湖水相互作用的模式和量化方法,探讨了地下水向湖泊排泄的时空变异性、地下水—湖水界面氮磷的迁移转化等难点问题,提出了未来研究的发展方向。

1 地下水—湖水相互作用模式

地下水—湖水的相互作用模式可分为 3 种:地下水向湖泊排泄、湖水向地下水渗漏、地下水的排泄与湖水渗漏同时存在。当地下水水位高于湖水水位时,地下水向湖泊排泄(图 1-a);当地下水水位低于湖水水位时,湖水向地下水渗漏(图 1-b);地下水水位与湖水水位关系在空间上不一致时,地下水排泄与湖水渗漏同时发生(图 1-c)。

近年来,地下水在水力梯度的驱动下向湖泊排泄水量的过程(又称湖底地下水排泄,图 2)成为研究热点。湖泊通常位于集水区的最低处,集水区内的地表径流和地下水径流都会聚集至湖泊中。因此,对于非平原区湖泊,地下水向湖泊排泄在大多情况下是一个长期的过程;而平原区地下水水位与湖泊水位的关系复杂,地下水排泄与湖泊渗漏往往随



a. 地下水向湖泊排泄;b. 湖水向地下水渗漏;c. 地下水排泄与湖水渗漏同时发生

图 1 地下水—湖水的相互作用模式

Fig. 1 Groundwater-lake interaction patterns



图 2 地下水向湖泊排泄的概念模式图

Fig. 2 Conceptual model diagram of groundwater discharge to lakes

着雨季和旱季交替进行^[17]。

1.1 地下水对湖泊水文的影响

随着各类探测技术的发展,湖底地下水排泄的表征与量化已日趋成熟。越来越多的研究显示,地下水是一些湖泊水均衡的重要端元。在一些无地表径流输入的封闭型湖泊中,湖底地下水排泄对湖泊水量的贡献甚至超过 90%^[18-19]。对于有地表径流输入的湖泊,地下水仍然可能是湖泊水量的主要来源。例如,在丹麦 Væng 湖泊的研究中发现,其平均地下水排泄强度高达 124.1 mm/d,地下水排泄的水量占总入湖水量的 66%^[20]。在湿润区,由于降水和地表径流丰富,导致湖泊水均衡研究大都忽略了地下水的贡献。而实际上,我国鄱阳湖和洞庭湖区地下水排泄输入的水量仍能够占总入湖水量的 10%左右^[8,21]。因此,地下水是湖泊水量的重要来源,对于维持湖泊水均衡与生态系统的完整性发挥

着不可忽视的作用。

目前全球范围内对湖底地下水排泄的研究越来越多,但是在不同国家的研究程度差异很大。欧美等发达国家学者率先开展了湖底地下水排泄研究^[22-24]。近年来,我国学者在湖底地下水排泄领域的研究也逐渐增加^[25-27]。在全球已开展湖底地下水排泄研究的 89 个湖泊中,其强度呈现出高度差异,范围跨越 2 个数量级(图 3),其中,地下水排泄强度小于 5 cm/d 的约占 82%,大于 10 cm/d 的约占 14%。

1.2 地下水排泄对湖泊水质的影响

地下水除了向湖泊输入水量之外,地下水中携带的营养盐也会随该过程进入湖泊而成为湖泊营养盐的一个潜在来源^[15,28]。随地下水进入湖泊的氮、磷会使湖泊营养程度加剧,促进藻类和水生微生物的生长,严重降低湖泊水质,导致水生生物的稳定



图 3 全球已报道的地下水向湖泊排泄强度分布

Fig. 3 Globally reported distribution of groundwater discharge intensity to lakes

和多样性降低。地下水对湖泊营养盐均衡的贡献取决于地下水排泄强度和地下水排泄所携带营养盐的浓度。大量研究表明,地下水排泄对湖泊的营养盐均衡有着重要贡献^[2,29-30]。即使地下水排泄在某些湖泊的水均衡中有着很小的贡献,但因为其携带营养盐可能具有很高的浓度而成为湖泊营养盐均衡中重要的输入端元^[1,15,31]。例如,在我国青藏高原的一

个冰川湖中,湖底地下水排泄仅占总入湖水量的 7.0%,但随地下水输入的总氮占输入量的 42.9%^[7];德国 Arendsee 湖地下水排泄输入的磷负荷占总入湖负荷的 50% 以上^[1]。已开展湖底地下水排泄携带营养盐的湖泊中,氮输入负荷在 $100 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上的约占 43%,磷输入负荷在 $100 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上的约占 48%(图 4)。

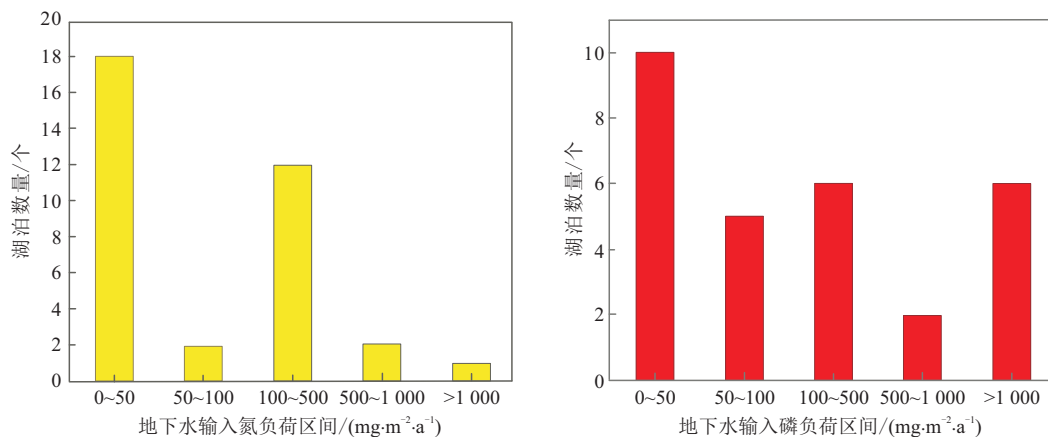


图 4 已知的全球不同地下水输入氮、磷负荷区间所对应的湖泊数量统计结果

Fig. 4 Statistical results of the number of lakes corresponding to different global groundwater input nitrogen and phosphorus load intervals

2 湖底地下水排泄的量化

2.1 水量交换的量化

研究湖底地下水排泄的难点在于如何量化。在湖底地下水排泄研究中,常见的量化方法包括渗流仪测量、水量平衡、氡质量平衡、温度示踪、数值模拟等。

2.1.1 渗流仪测量

渗流仪是一种放置于地表水沉积物上的装置,它可以记录地下水从湖床区域进入湖泊的净流量。相对于其他方法都依赖相关参数的测量,渗流仪提供了一种沉积物—水界面的流量直接测量方法。Lee 等^[32]最早设计了袋式渗流仪,当地下水流向湖水时,单位时间内进入收集袋的流体体积即为湖底地下水排泄通量。由于袋式渗流仪潜在的问题(如收集袋可能会扭曲或者折叠而影响测量结果),各种类型的自动式渗流仪相继出现,它们通过连续性地监测出水管的水流速度来计算得到交换量,方法包括热脉冲仪^[33]、超声波脉冲仪^[34]和电磁仪^[35]等。渗流仪测量所得到的结果只针对特定的空间和时间点,因此要想获取一片区域或一段时间内的平均交换量,需要通过多点或多频率地测量来实现。

2.1.2 水量平衡

水量平衡方法是通过建立湖泊水量平衡模型,

对模型中易测的端元(包括地表水流入、地表水流出、降水、蒸发等)进行测定,将残留项视为地下水端元的贡献^[36]。事实上,通过水量平衡模型仅能得到地下水与湖水的净交换量,通过耦合惰性环境示踪剂(如氯离子、氢氧同位素等)质量平衡模型即可分别得到湖底地下水排泄量和湖底地下水下渗量^[37]。此方法应用的对象是整个湖泊,其精确性主要依赖于河流流量和惰性示踪剂浓度的测定精度^[28]。

当湖泊为区域集水区时,地下水向湖泊排泄是区域地下水均衡的一个汇项。从理论上讲,地下水向湖泊排泄的水量可以通过地下水均衡方程计算得出,其应用对象是区域地下水系统,量化精度依赖于地下水系统中各源汇项的测量精度。地下水均衡法在德国 Arendsee 湖和死海的地下水排泄评估中得到了有效应用^[11,38]。由于集水区范围内地下水均衡方程中各端元水量的测量难度相比于地表水更大,因此通过地下水均衡方程计算湖底地下水排泄量的应用研究相对较少。

2.1.3 氡质量平衡

放射性同位素氡质量平衡方法是基于湖水中氡的源汇关系,将地下水排泄通量作为唯一的未知项来求取。²²²Rn 是 ²²⁶Ra 的子体,其单质形态是氡气,半衰期为 3.823 d。一般而言,湖水中 ²²²Rn 的源项包括地下水排泄、孔隙水扩散、母体 ²²⁶Ra 衰变,而汇

项包括大气逸散、自身衰变。 ^{222}Rn 是惰性气体, 化学性质保守, 不易与其他物质发生反应; 此外, 地层中的含铀矿物会不断衰变产生 ^{222}Rn , 使得 ^{222}Rn 常富集于地下水中, 同时地表水中的 ^{222}Rn 易于逸散到大气中, 使得地下水中的 ^{222}Rn 活度通常比地表水中高出 2~3 个数量级。这些优点使得 ^{222}Rn 被广泛应用于湖底地下水排泄的量化研究中^[39-42]。

2.1.4 温度示踪

温度示踪是基于特定点上湖水与不同深度地下水温度信号的时间序列, 结合其他参数计算得到湖水与地下水的交换量^[43-45]。热量在地下介质中的迁移由对流性热迁移和传导性热迁移组成, 可以用一维热运移方程来表征。自从 Stallman^[46] 建立精确的解析解以来, 针对热运移方程的各种解析方法和数值方法^[45, 47] 不断涌现并持续发展。基于这些方法, 相关的程序代码已被开发, 如 VFLUX^[48]。最近, 分布式温度传感技术^[49-50] 和热红外遥感技术^[12, 51] 可以同时高精度地进行湖水—沉积物界面温度的填图和不同区域湖水的温度填图, 依此来识别湖底地下水排泄的热区, 为其进一步的量化提供重要参考信息。

2.1.5 数值模拟

数值模拟技术在湖底地下水排泄的研究中也被广泛应用。其中, MODFLOW 联合 SWAT 模型、HYDROGEOSPHER 模型在湖底地下水排泄研究中的有效性已得到证实。将 MODFLOW 和 SWAT 模型进行结合, 以 SWAT 模型模拟的地表径流作为 MODFLOW 模型的流量边界, 根据地表水循环与地下水补排条件构建流域模型, 可求得地下水排泄的水文通量^[52]。HYDROGEOSPHERE 是地表径流和地下径流集成建模的程序, 是一个三维控制体积有限元地下水模型, 其基于对地表和地下流动状态组成的水文系统的严格概化^[53]。通过对地下水模型和地表水模型的边界条件和源汇项概化, 基于水均衡原理将 2 种模型平列起来同时求解, 模拟得到地下水向湖泊排泄的水文通量^[54]。这些模型的建立均需要获得集水区的地形地貌、土地利用类型以及土壤类型等特征属性, 对研究区域进行子单元划分, 同时需根据不同研究目的将气象数据与目标数据代入模型进行区域水文模拟。

2.2 营养盐交换的量化

在地下水向湖泊排泄的过程中, 地下水携带的营养盐会进入湖泊。因此, 地下水向湖泊输入营养盐的通量由两方面因素决定, ①地下水向湖泊排泄的水文通量; ②地下水中营养盐的浓度。在地下水向湖泊输入营养盐通量的研究中, 通常采用地下水排泄向湖泊输入的水量与地下水中营养盐浓度相乘

得到地下水向湖泊输入营养盐的通量^[1, 7, 25]。

此外, 地下水向湖泊输入营养盐的通量也可以通过数值模拟的方法得到。Taniguchi^[55] 和 Kang 等^[56] 利用一维对流—弥散方程拟合湖底沉积物惰性组分的垂向分布, 进而利用渗透系数、弥散系数等来预测地下水向湖泊输入营养盐的负荷。Cherkauer 等^[57] 利用二维模拟方法, 模拟了地下水向湖泊输入硝酸盐和氯离子的负荷并发现其在湖泊物质均衡中起重要作用。Nakayama 等^[58] 将湖区周边氮的空间分布与渗流模式耦合, 通过三维模拟得到了氮输入湖泊的负荷。

3 湖底地下水排泄的时空变异性

3.1 空间变异性

由于湖床渗透性、地形地貌、含水层性质等因素的空间差异, 湖底地下水排泄会出现显著的空间变异性。地下水排泄及其携带物质输入的空间模式会影响湖泊水质的空间分布。

在较大的空间尺度上, 位于排泄区的湖泊更易受地下水的影响^[59]。与湖泊具有水力联系的含水层的水力传导系数^[60] 及富水性是影响湖底地下水排泄的关键因素。孔隙含水层中颗粒较粗的沉积物、基岩裂隙含水层中发育的裂隙和岩溶含水层中较大的岩溶管道, 均可成为湖底地下水排泄创造良好的条件。此外, 富水性较高的含水层能为湖底地下水排泄提供足够的水量, 含水层的富水性又与降水量、集水区土地利用类型等因素相关^[11]。在较小的空间尺度上, 地下水排泄强度受控于湖床渗透性^[20, 37] 和水力梯度^[61] 等因素。通常湖床沉积物颗粒越粗, 湖床渗透性越好, 可为地下水排泄提供有利条件。例如在加拿大的 Simcoe 湖, 地下水排泄较强区域的湖床为颗粒较粗且分选性极差的冰碛物^[62]。湖床渗透性除了受沉积物岩性影响外, 还受局部优先通道的影响^[14]。例如, 在黏性土中植物根系生长及其他因素导致的裂缝可能成为地下水排泄的优先通道^[63]。当湖床岩性在空间上较为一致时, 弱透水性湖床厚度的变薄也能导致湖底地下水排泄强度的增大^[14]。在俄罗斯贝加尔湖东岸^[64] 和美国蒙大拿州乔治敦湖^[65] 的研究中发现, 对于构造湖来说, 与湖泊相连的断裂带往往能够形成地下水排泄的通道。地下水水位通常受地形影响较大^[66], 地形坡度较大区域的水力梯度较大, 进而会导致湖底地下水排泄的强度较大, 例如在德国东北部 Hinnensee 湖^[13] 和美国明尼苏达州 Shingobee 湖^[61] 的研究均发现了这一规律。

地下水向湖泊输入的营养盐负荷由地下水排泄

强度与地下水营养盐浓度两个方面因素决定。因此,在识别地下水向湖泊输入营养盐负荷的空间变异性时,除了识别地下水排泄强度的空间变异性之外,还需识别湖泊沿岸地下水中营养盐浓度的空间变异性。

3.2 时间变异性

在气候变化和人类活动的影响下,湖底地下水排泄会出现短时间序列(月际)的变异性 and 长时间序列(年际)的变异性。

当降水量在月际时间尺度上分布不均时,往往导致地下水位与湖水位变化不同步,进而使得地下水排泄呈现出季节变化。月际时间尺度上湖底地下水排泄的变化通常是周期性的。在季风区,通常在旱季地下水位高于湖水位时才存在地下水排泄,例如我国的洞庭湖^[8]和鄱阳湖^[17]。在高原区和高纬度区,只有在夏季气温较高导致季节性冻土融化才会使地下水排泄发生,例如我国青藏高原的西门错湖^[7]和北美洲阿拉斯加地区的湖泊^[67]。

地下水向湖泊排泄在长时间尺度上也会发生变化。在干旱区,气候变化和水资源过度利用导致近几十年来死海和咸海的地下水排泄量出现了剧烈改变^[68-69],地下水对湖泊维持的关键作用日益显现。在半干旱地区,我国东北部的呼伦湖由于2000年后湖泊面积急剧减小致使地下水对湖泊水量的贡献从1981—2000年的11%增加到了2000—2013年的50%^[70]。在湿润区,我国洞庭湖的地下水排泄量在三峡工程建设的前后呈现出先降低再升高的趋势^[71]。在高寒区,在全球气候变暖的影响下,湖泊集水区冻土的快速退化促进了地下水向青海湖的排泄,是湖泊面积在近年来有所扩张的不可忽视的因素^[72]。

4 地下水—湖水界面的营养盐循环

地下水—湖水交互界面上地下水与湖水发生频繁的交流、混合作用,存在显著的地球化学梯度(温度、氧气、有机质等)以及多样的微生物代谢,驱动着复杂的生物地球化学过程^[73],控制了氮、磷等营养盐和污染物的迁移转化与归趋,从而影响湖泊的水质与生态系统健康。

4.1 氮的归趋

地下水中的氮对湖泊的整体影响直接依赖于界面上的微生物群落与生物地球化学过程。地下水—湖水界面上氮的转化过程十分复杂,包括有机氮矿化、硝化、反硝化、厌氧氨氧化等诸多反应^[74-75]。湖底沉积物中的有机物矿化会释放出铵态氮,而铵态氮会随着流动的地下水进入湖水中^[76-78]。在地下水

向湖泊排泄过程中,大部分硝态氮可能在界面上通过生物地球化学反应被去除^[79-85]。湖床沉积物的最上部通常含有许多新沉积的易降解有机物,使得界面上的氧化还原电位降低,进而产生强烈的反硝化作用^[84,86]。当地下水接近沉积物—水界面时,硝态氮和亚硝态氮的浓度在流动路径的最末端显著下降^[86-87]。然而,在地下水—湖水界面上氧气没有减少的条件下,硝态氮可能会被大量传输到湖泊中^[88],这种情况通常发生在沙质的近岸地下水排泄区,这类区域的有机物含量通常很低,不利于反硝化作用的发生^[89-90]。此外,这类区域地下水向湖泊排泄的水流速度大,硝态氮与沉积物的接触时间短,导致反硝化作用的贡献很小^[87,91]。在缺氧与活性有机物有限的条件下,界面上存在同时发生反硝化与厌氧氨氧化的可能^[92]。

4.2 磷的归趋

地下水—湖水界面上磷的迁移转化过程主要包括有机磷矿化、铁或铝氧化物等的吸附、解吸以及含磷矿物的溶解与沉淀过程。在界面上,铁氧化物和锰氧化物在中性pH条件下会与磷快速结合发生沉淀,而在微碱性条件下,磷则很少被固定^[93]。不同成分的地下水混合可能导致铁在界面上发生沉淀,进而有效阻留磷酸盐^[83]。磷酸盐也可能在界面CO₂脱气和pH升高后与Ca结合发生沉淀,尽管这一过程极其缓慢^[94]。此外,磷在随地下水传输到湖水之前也可能与有机物或湿地植物结合^[3,93]。由于界面沉积物的高吸附能力或水中的高磷浓度,磷酸盐可能会被沉积物吸附。作为一种调控措施,可以人为地提高界面的吸附能力,捕获沉积物中的磷^[95]。在近岸湖底安装一个由3%的零价铁与采自于湖床0.6 m处的天然沉积物混合填充的渗透性反应墙,向湖泊流动的地下水在通过反应墙后,磷浓度急剧下降。然而,磷在界面上的吸附是一种平衡反应,这意味着解吸过程也可能发生,特别是在地球化学条件发生变化时。

5 展望

查明湖底地下水排泄在湖泊水质演化中的重要作用,不仅能为湖泊污染防控与生态修复实践提供科学依据,而且能为环境水科学的创新发展提供重要机遇。我们认为,该领域未来的发展方向主要包括以下3个方面。

(1)综合运用多种技术方法,精细表征湖底地下水排泄时空变异性。已有的各种技术手段在不同的时空尺度上有其特定的局限性。例如,从空间尺度上看,水量平衡与氮质量平衡模型主要用于整个湖

泊尺度,渗流仪测量与温度示踪主要针对小尺度,红外遥感可针对整个湖泊尺度但又无法进行量化。因此,只有开展不同技术方法之间的耦合联用,才能精确定湖底地下水排泄的空间热区与时间热点。

(2)揭示界面水文生物地球化学过程,精确量化地下水向湖泊排泄氮磷负荷。目前对于地下水向湖泊排泄氮磷负荷的量化,大多通过地下水中氮磷浓度与水文通量相乘得到,忽视了界面氮磷聚散过程的贡献和地下水向湖泊传输氮磷负荷的量化。因此,需要考虑地下水向湖泊排泄过程中界面氮磷聚散过程的贡献,以实现地下水向湖泊输入氮磷负荷的准确评估。

(3)评估强烈人类活动对地下水—湖水相互作用的影响。目前对于地下水—湖水相互作用,特别是地下水向湖泊排泄的研究主要围绕天然湖泊环境。近年来,世界范围内湖区各类人类活动加剧,特别是围湖造田、水产养殖、工业填埋等,导致很多湖泊的结构与功能受到显著的影响,但它们对地下水—湖水相互作用和湖泊水质的影响尚不清楚。由于污染源复杂多样,湖泊污染溯源尤为困难,导致精准治污难以实施、见效。因此,识别人类活动对湖泊结构、功能改造的影响,进而揭示其对地下水—湖水相互作用的影响,是准确预测湖底地下水排泄与湖泊水质演化趋势的关键。

参考文献:

- [1] Meinikmann K, Hupfer M, Lewandowski J. Phosphorus in groundwater discharge: A potential source for lake eutrophication[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 214-226.
- [2] Knights D, Parks K C, Sawyer A H, et al. Direct groundwater discharge and vulnerability to hidden nutrient loads along the Great Lakes coast of the United States[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 331-341.
- [3] Kazmierczak J, Postma D, Müller S, et al. Groundwater-controlled phosphorus release and transport from sandy aquifer into lake[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(9): 2188-2204.
- [4] Rakhimbekova S, O'Carroll D M, Oldfield L E, et al. Spatio-temporal controls on septic system derived nutrients in a near-shore aquifer and their discharge to a large lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141262.
- [5] Holman I P, Howden N J, Bellamy P, et al. An assessment of the risk to surface water ecosystems of groundwater P in the UK and Ireland[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8): 1847-1857.
- [6] Burnett W C, Wattayakorn G, Supcharoen R, et al. Groundwater discharge and phosphorus dynamics in a flood-pulse system: Tonle Sap Lake, Cambodia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 79-91.
- [7] Luo X, Kuan X, Jiao J J, et al. Evaluation of lacustrine groundwater discharge, hydrologic partitioning, and nutrient budgets in a proglacial lake in the Qinghai-Tibet Plateau: Using ^{222}Rn and stable isotopes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(10): 5579-5598.
- [8] Sun X, Du Y, Deng Y, et al. Contribution of groundwater discharge and associated contaminants input to Dongting Lake, Central China, using multiple tracers (^{222}Rn , ^{18}O , Cl^-) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(3): 1239-1255.
- [9] Yu L, Rozemeijer J C, Broers H P, et al. Drivers of nitrogen and phosphorus dynamics in a groundwater-fed urban catchment revealed by high-frequency monitoring[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25: 69-87.
- [10] Brookfield A E, Hansen A T, Sullivan P L, et al. Predicting algal blooms: Are we overlooking groundwater? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769(1): 144442.
- [11] Meinikmann K, Lewandowski J, Nützmann G. Lacustrine groundwater discharge: Combined determination of volumes and spatial patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 502: 202-211.
- [12] Lewandowski J, Meinikmann K, Ruhtz T, et al. Localization of lacustrine groundwater discharge (LGD) by airborne measurement of thermal infrared radiation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 119-125.
- [13] Tecklenburg C, Blume T. Identifying, characterizing and predicting spatial patterns of lacustrine groundwater discharge [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(10): 5043-5063.
- [14] Hare D K, Boutt D F, Clement W P, et al. Hydrogeological controls on spatial patterns of groundwater discharge in peatlands [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6031-6048.
- [15] Lewandowski J, Meinikmann K, Nützmann G, et al. Groundwater—the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 2: Effects of groundwater on nutrients[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(13): 2922-2955.
- [16] Naranjo R C, Niswonger R G, Smith D, et al. Linkages between hydrology and seasonal variations of nutrients and periphyton in a large oligotrophic subalpine lake[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 877-890.
- [17] Li Y, Zhang Q, Liu X, et al. Water balance and flashiness for a large floodplain system: A case study of Poyang Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 135499.
- [18] Gurrieri J T, Furniss G. Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 297(1/4): 187-208.
- [19] Stets E G, Winter T C, Rosenberry D O, et al. Quantification of surface water and groundwater flows to open-and closed-basin lakes in a headwaters watershed using a descriptive oxygen stable isotope model[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(3): 2013-2024.
- [20] Kidmose J, Nilsson B, Engesgaard P, et al. Descarga localizada de água subterrânea com fósforo para um lago drenante eutrófico (Lago Væng, Dinamarca): Implicações para o estado ecológico do lago e sua reabilitação[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(8): 1787-1802.
- [21] Liao F, Wang G, Shi Z, et al. Estimation of groundwater discharge and associated chemical fluxes into Poyang Lake, Chi-

- na: Approaches using stable isotopes (δD and $\delta^{18}O$) and radon [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1625-1638.
- [22] Harvey F E, Lee D R, Rudolph D L, et al. Locating groundwater discharge in large lakes using bottom sediment electrical conductivity mapping[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(11): 2609-2615.
- [23] Sebestyen S D, Schneider R L. Dynamic temporal patterns of nearshore seepage flux in a headwater Adirondack Lake[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(3/4): 137-150.
- [24] Ji T, Peterson R N, Befus K M, et al. Characterization of groundwater discharge to Nottawasaga Bay, Lake Huron with hydraulic and ^{222}Rn measurements[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, 43(5): 920-929.
- [25] Kong F, Sha Z, Luo X, et al. Evaluation of lacustrine groundwater discharge and associated nutrients, trace elements and DIC loadings into Qinghai Lake in Qinghai-Tibetan Plateau, using radium isotopes and hydrological methods[J]. *Chemical Geology*, 2019, 510: 31-46.
- [26] Yi L, Lu X, Nie Z, et al. Delineation of groundwater flow and estimation of lake water flushing time using radium isotopes and geochemistry in an arid desert: The case of Badain Jaran Desert in western Inner Mongolia (CHN) [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 122: 104740.
- [27] Yang N, Zhou P, Wang G, et al. Hydrochemical and isotopic interpretation of interactions between surface water and groundwater in Delingha, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126243.
- [28] Rosenberry D O, Lewandowski J, Meinikmann K, et al. Groundwater-the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 1: Effects of groundwater on hydrology [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(13): 2895-2921.
- [29] Robertson D M, Rose W J, Saad D A. Water quality, hydrology, and phosphorus loading to Little St. Germain Lake, Wisconsin, with special emphasis on the effects of winter aeration and ground-water inputs[R]. Vilas; US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005.
- [30] Özen A, Karapinar B, Kucuk I, et al. Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management [J]. *Hydrobiologia*, 2010, 646(1): 61-72.
- [31] Jarosiewicz A, Witek Z. Where do nutrients in an inlet-less lake come from? The water and nutrient balance of a small mesotrophic lake[J]. *Hydrobiologia*, 2014, 724(1): 157-173.
- [32] Lee T M, Swancar A. Influence of evaporation, groundwater, and uncertainty in the hydrologic budget of Lake Lucerne, a seepage lake in Polk County, Florida[R]. Vilas; U. S. Geological Survey Water Supply Paper, 1997.
- [33] Taniguchi M, Fukuo Y. Continuous measurements of groundwater seepage using an automatic seepage meter[J]. *Groundwater*, 1993, 31(4): 675-679.
- [34] Paulsen R J, Smith C F, O'Rourke D, et al. Development and evaluation of an ultrasonic groundwater seepage meter [J]. *Groundwater*, 2001, 39(6): 904-911.
- [35] Rosenberry D O, Morin R H. Use of an electromagnetic seepage meter to investigate temporal variability in lake seepage [J]. *Groundwater*, 2004, 42(1): 68-77.
- [36] Choi J, Harvey J W. Quantifying time-varying groundwater discharge and recharge in wetlands of the northern Florida Everglades[J]. *Wetlands*, 2000, 2: 500-511.
- [37] Kidmose J, Engesgaard P, Nilsson B, et al. Spatial distribution of seepage at a flow-through lake; Lake Hampen, Western Denmark[J]. *Vadose Zone Journal*, 2001, 10(1): 110-124.
- [38] Sachse A, Fischer C, Laronne J B, et al. Water balance estimation under the challenge of data scarcity in a hyperarid to Mediterranean region [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(13): 2395-2411.
- [39] Schmidt A, Gibson J J, Santos I R, et al. The contribution of groundwater discharge to the overall water budget of two typical Boreal lakes in Alberta/Canada estimated from a radon mass balance[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(1): 79-89.
- [40] Dimova N T, Burnett W C. Evaluation of groundwater discharge into small lakes based on the temporal distribution of radon-222 [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(2): 486-494.
- [41] Dimova N T, Burnett W C, Chanton J P, et al. Application of radon-222 to investigate groundwater discharge into small shallow lakes[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 112-122.
- [42] Petermann E, Gibson J J, Knöller K, et al. Determination of groundwater discharge rates and water residence time of groundwater-fed lakes by stable isotopes of water (^{18}O , 2H) and radon (^{222}Rn) mass balance[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32: 805-816.
- [43] Constantz J E. Interaction between stream temperature, stream flow, and groundwater exchanges in alpine streams[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(7): 1609-1615.
- [44] Anderson M P. Heat as a ground water tracer[J]. *Ground Water*, 2005, 43(6): 951-968.
- [45] Keery J, Binley A, Crook N, et al. Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes: Development and application of an analytical method using temperature time series[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336: 1-16.
- [46] Stallman R W. Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(12): 2821-2827.
- [47] Hatch C E, Fisher A T, Revenaugh J S, et al. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(10): W10410. 1-W10410. 14.
- [48] Gordon R P, Lautz L K, Briggs M A, et al. Automated calculation of vertical pore-water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 142-158.
- [49] Selker J S, Thevenaz L, Huwald H, et al. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12): 12202-1-12202-8.
- [50] Blume T, Krause S, Meinikmann K, et al. Upscaling lacustrine groundwater discharge rates by fiber-optic distributed temperature sensing [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(12): 7929-7944.
- [51] Arricibita A I M, Dugdale S J, Krause S, et al. Thermal infrared imaging for the detection of relatively warm lacustrine groundwater discharge at the surface of freshwater bodies[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 281-289.

- [52] Feinstein D T, Hunt R J, Reeves H W. Regional groundwater-flow model of the Lake Michigan Basin in support of Great Lakes Basin water availability and use studies[R]. Vilas; U. S. Geological Survey, 2010.
- [53] Xu S, Frey S K, Erler A R, et al. Investigating groundwater-lake interactions in the Laurentian Great Lakes with a fully-integrated surface water-groundwater model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125911.
- [54] 曾献奎. 基于 HydroGeoSphere 的凌海市大、小凌河扇地地下水—地表水耦合数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009. Zeng X K. Numerical simulation of groundwater-surface water coupling in the big and little Linghe fans of Linghai City based on HydroGeoSphere[D]. Changchun: Jilin University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [55] Taniguchi M. Evaluation of the groundwater capture zone for modeling of nutrient discharge [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15: 1939-1949.
- [56] Kang W J, Kolasa K V, Rials M W. Groundwater inflow and associated transport of phosphorus to a hypereutrophic lake [J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(4): 565-575.
- [57] Cherkauer D S, McKereghan P F, Schalch L H. Delivery of chloride and nitrate by ground water to the great lakes: Case study for the Door Peninsula, Wisconsin [J]. *Groundwater*, 1992, 30(6): 885-894.
- [58] Nakayama T, Watanabe M. Missing role of groundwater in water and nutrient cycles in the shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan [J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, 22(8): 1150-1172.
- [59] Winter T C. Numerical simulation of steady state three-dimensional groundwater flow near lakes [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(2): 245-254.
- [60] Schneider R L, Negley T L, Wafer C. Factors influencing groundwater seepage in a large, mesotrophic lake in New York [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310: 1-16.
- [61] Kishel H F, Gerla P J. Characteristics of preferential flow and groundwater discharge to Shingobee Lake, Minnesota, USA [J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(10): 1921-1934.
- [62] Wallace H, Ji T, Robinson C E. Hydrogeological controls on heterogeneous groundwater discharge to a large glacial lake [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, 46(3): 476-485.
- [63] Smart R P, Holden J, Dinsmore K J, et al. The dynamics of natural pipe hydrological behaviour in blanket peat [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(11): 1523-1534.
- [64] Golubev V A, Klerkx J, Kipfer R. Heat flow, hydrothermal vents and static stability of discharging thermal water in Lake Baikal (south-eastern Siberia) [J]. *Bulletin-Centres de Recherches Exploration Production Elf-Aquitaine*, 1993, 17(1): 53-65.
- [65] Shaw G D, White E S, Gammons C H. Characterizing groundwater-lake interactions and its impact on lake water quality [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492: 69-78.
- [66] Tóth J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(16): 4795-4812.
- [67] Dabrowski J S, Charette M A, Mann P J, et al. Using radon to quantify groundwater discharge and methane fluxes to a shallow, tundra lake on the Yukon-Kuskokwim Delta, Alaska [J]. *Biogeochemistry*, 2020, 148(1): 69-89.
- [68] Levy Y, Burg A, Yechieli Y, et al. Displacement of springs and changes in groundwater flow regime due to the extreme drop in adjacent lake levels: The Dead Sea rift [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124928.
- [69] Jarsjö J, Destouni G. Groundwater discharge into the Aral Sea after 1960 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 47(1/4): 109-120.
- [70] Han Z, Shi X, Jia K, et al. Determining the discharge and recharge relationships between lake and groundwater in Lake Hulun using hydrogen and oxygen isotopes and chloride ions [J]. *Water*, 2019, 11(2): 264.
- [71] 孙晓梁, 杜尧, 邓娅敏, 等. 1996—2017 年枯水期地下水排泄对洞庭湖水量均衡的贡献及其时间变异性 [J]. *地球科学*, 2021, 46(7): 2555-2564.
- Sun X L, Du Y, Deng Y M, et al. Contribution of groundwater discharge to water balance in Dongting Lake during the dry period from 1996 to 2017 and its temporal variability [J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2555-2564 (in Chinese with English abstract).
- [72] Liu W, Xie C, Wang W, et al. The impact of permafrost degradation on lake changes in the Endorheic Basin on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Water*, 2020, 12(5): 1287.
- [73] 苏小四, 师亚坤, 董维红, 等. 潜流带生物地球化学特征研究进展 [J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(3): 337-351.
- Su X S, Shi Y K, Dong W H, et al. Progress in the biogeochemical characteristic of the hyporheic zone [J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 2019, 41(3): 337-351 (in Chinese with English abstract).
- [74] Riettt M O, Buss S R, Morgan P, et al. Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes [J]. *Water Research*, 2008, 42(16): 4215-4232.
- [75] Buss S R, Herbert A W, Morgan P, et al. A review of ammonium attenuation in soil and groundwater [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2004, 37(4): 347-359.
- [76] Fellows C R, Brezonik P L. Fertilizer flux into two Florida lakes via seepage [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10(2): 174-177.
- [77] Brock T D, Lee D R, Janes D, et al. Groundwater seepage as a nutrient source to a drainage lake: Lake Mendota, Wisconsin [J]. *Water Research*, 1982, 16(7): 1255-1263.
- [78] Corbett D R, Chanton J, Burnett W, et al. Patterns of groundwater discharge into Florida Bay [J]. *Limnology & Oceanography*, 1999, 44(4): 1045-1055.
- [79] Valiela I, Costa J, Foreman K, et al. Transport of groundwater-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters [J]. *Biogeochemistry*, 1990, 10(3): 177-197.
- [80] Vanek V. Riparian zone as a source of phosphorus for a groundwater-dominated lake [J]. *Water Research*, 1991, 25(4): 409-418.
- [81] Dahm C N, Grimm N B, Marmonier P, et al. Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters [J]. *Freshwater Biology*, 1998, 40(3): 427-451.
- [82] Bowen J L, Kroeger K D, Tomasky G, et al. A review of land-sea coupling by groundwater discharge of nitrogen to New England estuaries: Mechanisms and effects [J]. *Applied Geo-*

- chemistry, 2006, 22(1): 175-191.
- [83] Spiteri C, Slomp C P, Charette M A, et al. Flow and nutrient dynamics in a subterranean estuary (Waquoit Bay, MA, USA): Field data and reactive transport modeling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(14): 3398-3412.
- [84] Ibáñez J S P, Leote C, Rocha C. Porewater nitrate profiles in sandy sediments hosting submarine groundwater discharge described by an advection-dispersion-reaction model [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 103(1/3): 159-180.
- [85] Ommen D A O, Kidmose J, Karan S, et al. Importance of groundwater and macrophytes for the nutrient balance at oligotrophic Lake Hampen, Denmark [J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(3): 286-296.
- [86] Keeney D R, Chen R L, Graetz D A. Importance of denitrification and nitrate reduction in sediments to the nitrogen budgets of lakes [J]. *Nature*, 1971, 233: 66-76.
- [87] Capone D G, Slater J M. Interannual patterns of water table height and groundwater derived nitrate in nearshore sediments [J]. *Biogeochemistry*, 1990, 10(3): 277-288.
- [88] Reay W G, Gallagher D L, Simmons G M. Groundwater discharge and its impact on surface water quality in a Chesapeake bay inlet [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 28(6): 1121-1134.
- [89] Vanek V. The interactions between lake and groundwater and their ecological significance [J]. *Stygologia*, 1987, 3(1): 1-23.
- [90] Schafran G C, Driscoll C T. Porewater acid/base chemistry in near-shore regions of an acidic lake [J]. *Biogeochemistry*, 1990, 11(2): 131-150.
- [91] Garcia-Solsona E, Garcia-Orellana J, Masqué P, et al. Groundwater and nutrient discharge through karstic coastal springs (Castelló, Spain) [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2625-2638.
- [92] Stotiker D L, Repert D A, Smith R L, et al. Hydrologic controls on nitrogen cycling processes and functional gene abundance in sediments of a groundwater flow-through lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 3649.
- [93] Jasper G J. Uptake of phosphate by iron hydroxides during seepage in relation to development of groundwater composition in coastal areas [J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, 28(4): 675-681.
- [94] Griffioen J. Extent of immobilisation of phosphate during aeration of nutrient-rich, anoxic groundwater [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320: 359-369.
- [95] McCobb T D, LeBlanc D R, Massey A J. Monitoring the removal of phosphate from groundwater discharging through a Pond-Bottom permeable reactive barrier [J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2009, 29(2): 43-55.