

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.014

# 多水塘系统水文连通及其对磷输移影响研究进展

谢 晖<sup>1</sup>, 董建玮<sup>2</sup>, 李玉凤<sup>2</sup>, 商美琪<sup>2</sup>, 赖锡军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 多水塘系统是农业流域常见的小型水利工程, 空间交错的沟塘结构导致其水文连通过程复杂多变, 对流域营养盐截源控污影响显著。为强化多水塘系统水文连通对磷输移影响的认知, 以多水塘系统及其水文连通的定义内涵为切入点, 归纳了多水塘水文连通性评估方法; 基于景观格局、水文过程和生物地球化学过程聚焦多水塘系统对磷输移的调控作用; 阐明了水文连通变化通过驱动干湿交替对磷输移环境以及通过调节水分滞留时间对磷输移通量的影响。指出多水塘系统水文连通变化的驱动机制、沟塘滞留效率的尺度扩展、定量模拟和优化调控是未来多水塘系统环境效应研究的重要方向, 以期为保障多水塘水质改善功能提供理论依据。

**关键词:** 多水塘; 水文连通; 面源污染; 沉积物; 磷

**中图分类号:** X143      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2022)05-0848-11

河川廊道是生源要素自流域源头向海岸输移的重要通道, 其中湖泊、湿地、水库和水塘等静态蓄水廊道是营养物质滞留降减和迁移转化的重要场所<sup>[1]</sup>。据统计, 全球约4%的非冰川地表由静态蓄水廊道构成, 其中面积小于1 ha的水体约占1/3<sup>[2]</sup>。相比于湖泊、水库等大型水域, 水塘面积虽小, 但局地分布密集, 累积覆盖度较高。水塘与水塘间常通过沟渠相互连接形成具有功能整体性和结构连通性的农业水适应性系统, 常见于中国东南部地区<sup>[3]</sup>。多水塘系统兼具环流型水域和径流型水域的特点, 在空间上形成点(沟塘节点)、线(沟渠)、面(水塘)交错的独特结构, 使以水为媒介的物质和能量在系统内的连通过程复杂且多变, 从而影响营养物质的截留和释放机制, 因此, 多水塘的水文连通对流域水环境过程具有重要的影响。

随着人类活动干扰加剧, 多水塘在生源要素地球化学循环中发挥的重要性逐步凸显, 其所受关注日趋增加。学界对沟塘的研究对象也从田间尺度的个体水资源分配调节(如蓄水排水、防洪抗旱等), 逐渐耦合景观、水文、水质、沉积和生物等要素, 转向流域尺度的多水塘系统生态环境效应(如多水塘的水文连通性评估<sup>[4]</sup>、滞蓄消纳面源污染<sup>[5]</sup>、促进河流生态系统新陈代谢<sup>[6]</sup>、维持生物多样性<sup>[7]</sup>等), 但对多水塘系统内复杂沟塘结构和连通过程的认识仍有不足。磷是导致水体富营养化的重要限制因子, 面源磷流失是当前全球面临的主要环境问题之一<sup>[8-9]</sup>。多水塘系统是磷截留与流失的关键廊道, 当水力减弱时沟塘可形成稳定的沉积和缓冲环境, 磷被颗粒吸附后随之沉降进而降减转储; 当水力条件改变时这些沉积磷解吸并再次释放, 重新向下游迁移扩散<sup>[10]</sup>。这种源-汇过程交替的重要驱动因素正是多水塘系统的水文连通变化。水文连通是磷在沟塘迁移的重要纽带和载体, 受水文情势驱动从时间上调节多水塘系统内水分与物质的滞留和释放; 在空间上影响系统内部水流的来源、路径、流态和滞时<sup>[11-12]</sup>, 从而调控磷在多水塘系统内的输送过程和通量。多水塘水文连通对磷输移的影响是研究流域营养盐循环及其截留机制的关键, 尽管当前对磷在沟塘内的输移研

收稿日期: 2022-06-28; 网络出版日期: 2022-09-27

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220926.0928.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42007362); 国家重点研发计划资助项目(2021YFD1700600)

作者简介: 谢晖(1988—), 男, 安徽淮南人, 助理研究员, 博士, 主要从事流域面源污染模拟和调控方面研究。

E-mail: hxie@niglas.ac.cn

通信作者: 董建玮, E-mail: jwdong@nnu.edu.cn

究已取得一定进展, 但对其中的科学认知尚缺乏全面梳理和系统归纳。

本文通过挖掘多水塘系统的静态结构性阐明其影响磷输移的宏观调控作用及系统内微观机理过程, 诠释多水塘的动态功能性揭示水文连通对多水塘系统磷输移环境和输移通量的驱动机制, 阐明多水塘系统水文连通对磷纵向输运及垂向交换的影响, 并提出未来研究可进一步深化的发展动向, 以期开展流域营养盐截源控污和保障多水塘水质改善功能提供理论依据和技术参考。

## 1 多水塘的水文连通性

多水塘是指多个水塘通过沟渠相互连接而形成的有机集合(图1), 是农业活动过程中为应对外部水环境变化形成的一种水适应性景观和系统, 其基本构成要素为水塘和沟渠, 水塘与水塘之间的连通关系通过沟渠得以实现<sup>[3]</sup>。水塘多指面积小于5 ha、水深小于8 m、一年中存在至少4个月、由建坝截蓄或平地围池形成、兼具自然和人工属性的小型水体, 常称作池塘、坑塘或陂塘<sup>[13]</sup>。沟渠是位于农田、道路或水塘附近长期过水或间歇性淹水用于农田灌排的廊道<sup>[14]</sup>。早在春秋中期古人就对多水塘系统加以利用, 后在淮河和汉水流域得以发展, 逐渐在长江以南丘陵山区盛行<sup>[15]</sup>, 解决了水塘水源不足以及沟渠缺乏蓄水能力的问题。从生态学角度来说, 水塘和沟渠本质上均属于“小微湿地”的概念范畴, 二者在淹水水生植物、生物群落等方面均表现出湿地的特征属性<sup>[16]</sup>。当前报道的中国东南部多水塘典型区主要分布于江苏扬州风岭水库<sup>[4]</sup>、安徽巢湖六岔河流域<sup>[3]</sup>、江苏句容李塔水库<sup>[17]</sup>、台湾桃园灌区<sup>[18]</sup>、安徽巢湖炯烔河流域<sup>[19]</sup>等地(图2, 数据来源: World Image Wayback), 水塘数量从数十至上千不等。

### 1.1 水文连通与沟塘结构

水文连通是指在纵向连通、横向连通、垂向连通和时间连通4个维度上, 以水为媒介的物质交换、能量传递、生物迁移等过程在湖泊-流域关键带各要素之间的传输转移能力<sup>[20-22]</sup>。多水塘系统既有外在整体性, 也有内在稳定性。水文连通则是将其系统内部要素耦联、且连接系统整体与外部环境的重要枢纽, 其多维特征主要体现在纵向和横向维度。系统内高程差产生的水力梯度促进水流的上下游(纵向)传递, 该水文连通强度取决于沟塘内的水文水动力过程。上游水源的分散汇流带来水、沙、营养盐等物质在系统内发生物理和生化过程后, 侧向(横向)输送至主河道, 受连通方向、路径、距离、频率等影响。

多水塘系统的水文连通状态、连通路径及影响不尽相同(图3), 取决于地质结构、地形地貌、水文情势变化、塘口水门设计、人类活动扰动以及沟塘结构等<sup>[23]</sup>。例如, 上游基流补给充足时沟塘间可保持持续性连通状态, 而地处平原灌区的多水塘系统受降水事件和农田灌排活动影响通常呈现间歇性连通状态<sup>[24]</sup>。沟渠是多水塘系统水文连通在地表水过程中的外显路径, 与之相对的为地下水, 水塘水分与地下水通过水力交互的双向补给实现了地表水和地下水的垂向连通, 但此种连通相对于地表形式的连通显得极其微弱<sup>[25]</sup>。这3种连通方式(与河流直接连通、通过沟渠连通及地下水连通)对应的流域水分传输时间依次增加, 在雨洪汇流、拦蓄排泄、地下水位调控等不同层面影响流域水、沙和营养盐的输移过程<sup>[26]</sup>。

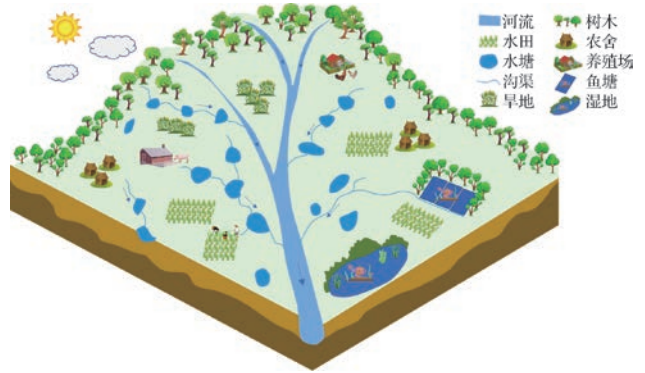


图1 多水塘在流域中的地理分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of multi-pond systems in a watershed

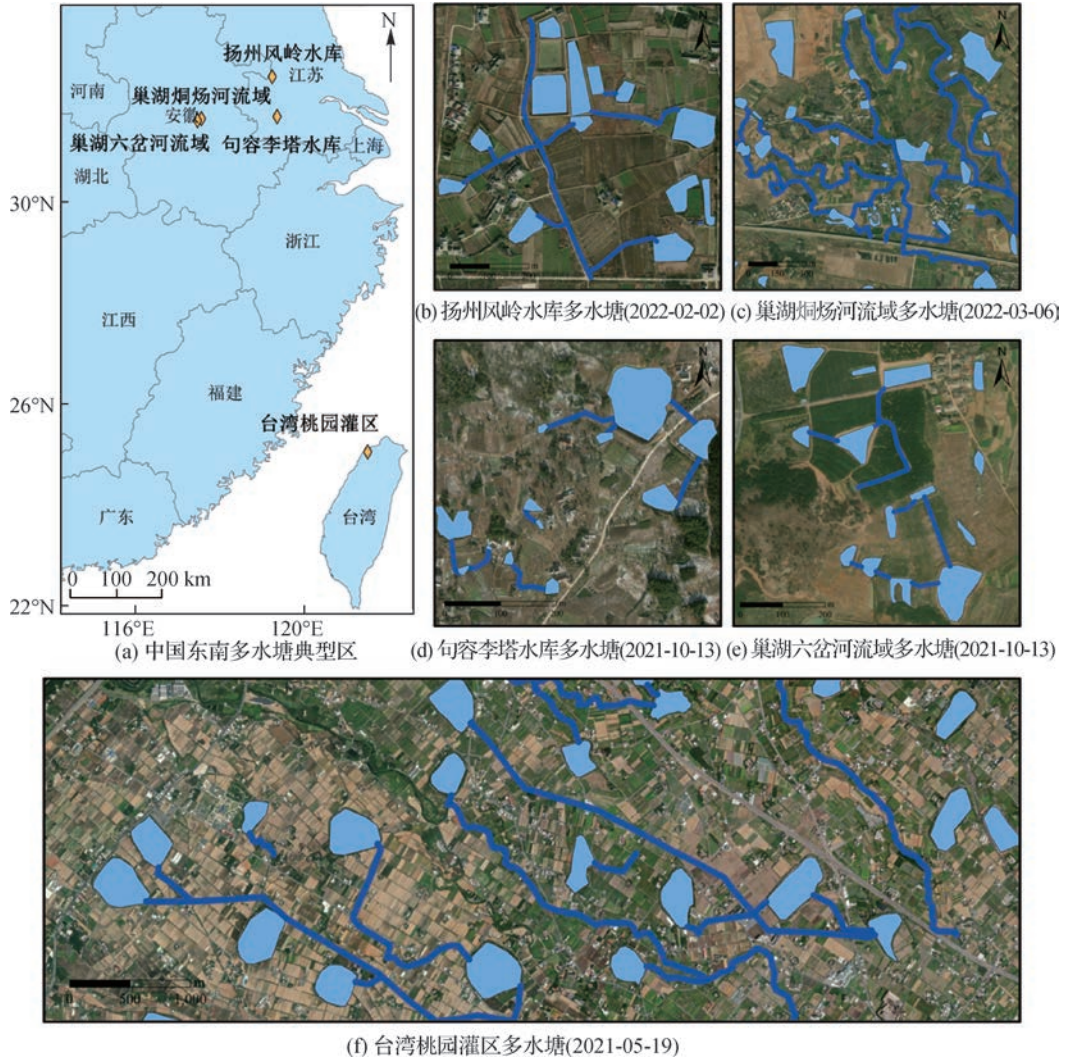


图 2 中国东南部多水塘典型区卫星影像

Fig. 2 Satellite images of typical multi-pond areas in Southeast China

多水塘系统的沟塘结构从景观格局的角度影响着水文连通状态和地表水循环方式。相关研究主要集中在测定与量化水塘和沟渠的数量、面积和几何形态等方面。区域和流域尺度下的研究基于遥感影像和 DEM 等基础数据提取水塘水面密度、水塘库容、沟渠长度、沟渠密度和网络环度等特征以反映沟塘景观单元的空间异质性<sup>[1,27-29]</sup>；田间尺度下的研究依赖高精度沟塘地理空间数据，通常需借助集成图像传感器、全球定位系统模块和惯性测量模块的无人机航测技术等手段<sup>[30]</sup>。沟塘结构特征被认为是影响多水塘系统水文连通的重要因素，沟塘组合模式进一步影响多水塘水文连通的异质性和复杂性。根据系统内水塘位置的分布，典型的沟塘组合模式可分为梯级串联式、交叉并联式、“长藤结瓜”式和渠网连塘混合式等<sup>[31]</sup>，其中尤以梯级串联式最为常见(图 3)，其本质是利用水塘间的水力梯度，使纵向水文连通促进多水塘系统内部要素的联系。

### 1.2 多水塘水文连通性及其评估

水文连通性是量化水文连通的指标，包括结构连通性和功能连通性<sup>[20,32]</sup>，表 1 总结了多水塘系统水文连通性的评估方法。多水塘系统的结构连通性关注沟塘连接形成的点线面组合结构，相关研究以沟塘间距、沟塘节点数量和沟渠长度等指示性指标推演了水文连通的路径和格局。多水塘系统的功能连通性侧重于物质流和能量流与水文过程的实际交互及动态变化，相关研究通过原位观测、模型模拟、遥感反演等手段获得水

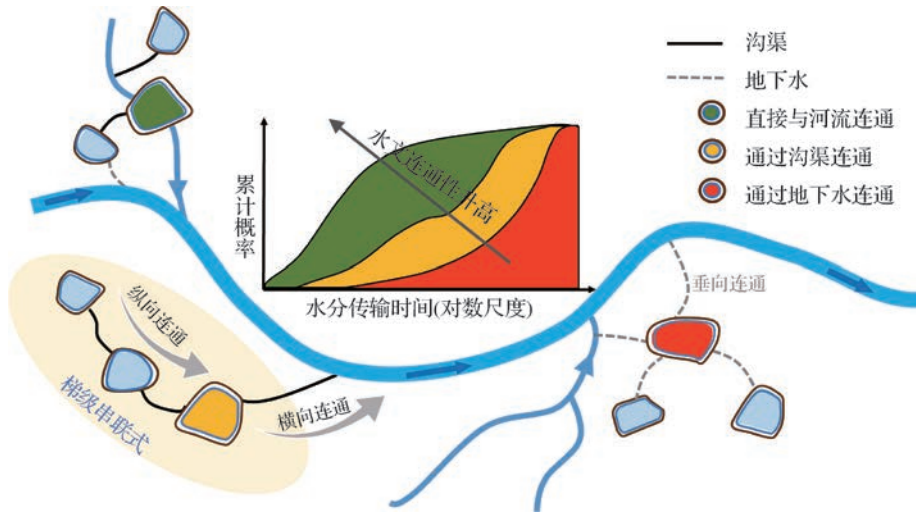


图 3 多水塘系统水文连通的类型、路径及影响

Fig. 3 Hydrological connectivity types, pathways, and impacts in multi-pond systems

位、径流、水温、盐度和微生物等指示性因子的动态变化, 并以此评估多水塘系统内部以及和外界环境的水文连通状态与强度。此外, 示踪试验可进一步反映水文连通性在沟塘中的沿程变化和动态过程, 通过识别水分和溶质运移的迁移速度、弥散系数等水力参数以揭示水分的位移、溶质的定量与定位, 从而追踪水文连通的宏观路径和微观过程<sup>[33]</sup>。对于梯级串联式多水塘系统, 由于水力梯度的作用, 水文功能连通性受到水动力场脉冲变化的显著影响, 但沟塘结构下的水文连通动力学机制尚缺乏研究。

表 1 多水塘水文连通性评估方法总结

Table 1 Summary of assessment methods for hydrological connectivity in multi-pond systems

连通性分类	指示指标	连通对象	评估方法
结构性连通	距离	水塘和沟渠	将水塘网格中心与其最近沟渠间的距离定义连通性 <sup>[34]</sup>
	距离	水塘和水塘	应用图论理论将水塘视为“节点”, 以“边”定义水塘和水塘的连通关系 <sup>[35]</sup>
	数量, 长度	水塘和水塘	以沟塘连接节点数量和沟渠长度构建连通性指数 <sup>[18]</sup>
功能性连通	水位	水塘和沼泽	通过连通对象水位变化的一致性判断水文连通的存在 <sup>[23]</sup>
	径流	水塘和水塘	以地表径流和水塘蓄水容量构建连通性指数 <sup>[4]</sup>
	水温	水塘和河道	原位高频观测水温, 通过温差评估水塘和河道间的连通性 <sup>[36]</sup>
	盐度	水塘、沟渠与海水	联合遥感和机器学习反演高分辨率水体盐度含量分布, 以此评价塘渠与海洋的连通性 <sup>[37]</sup>
	微生物	水塘和河道	采用 16S rRNA 基因测序技术获得水塘和河流中微生物群落结构分布, 利用 Bray-Curtis 相异度指标计算水塘和河流间的组成差异, 以此表征水文连通性强度 <sup>[38]</sup>

## 2 多水塘对磷输移的影响

多水塘系统对磷输移的影响多表现为显著的滞留作用。例如, 对汉江平原灌排单元沟塘系统的观测和模拟试验结果表明, 该沟塘系统是营养盐输移路径中的“汇”, 对磷负荷的滞留率范围为 12% ~ 92%, 平均滞留率为 28%<sup>[39]</sup>。此外, 受沟塘自身水质及其净化能力影响, 多水塘系统亦具有潜在的磷流失风险<sup>[10]</sup>。在流域和田间尺度下, 多水塘系统对磷输移的影响机制可归纳为景观格局、水文过程及生物地球化学过程。

## 2.1 基于景观格局的影响

陆域的产流过程伴随着土壤侵蚀,磷随径流和泥沙流失后进入多水塘系统,水塘增加了地表持水的面积和容量,是以持留型功能为主的景观结构,沟渠是以缓冲型功能为主的传输通道<sup>[40]</sup>。因此在流域尺度下多水塘系统可从景观格局的角度影响磷输移过程与通量。上覆水与沉积物分别是磷输移和控磷的关键介质,磷含量变化对于磷的持留或输出具有决定性影响。水塘和沟渠的空间位置直接影响系统自身水相与沉积相的磷持留量,并取决于周边景观类型带来的外源磷输入。多水塘系统的外部景观类型对水塘上覆水总磷持留量的解释度远大于其自身属性,且农田和居民区面积位列最大贡献量<sup>[41]</sup>。位于水田、旱地、村庄附近的沟塘中沉积相磷持留量不尽相同,承接农村生活污水的村塘和沟渠相比于靠近农田的沟塘,其上覆水和沉积物中磷持留量已接近饱和度阈值<sup>[42]</sup>,释放风险极大。景观格局对水塘磷输移的影响具有空间尺度效应,100 m缓冲区范围内的景观格局指数解释度较好<sup>[43]</sup>。此外,多水塘系统作为不同斑块类型的组合,影响着局地斑块密度、分离度、破碎度等,从而在景观格局层面影响磷的输移过程。在地处亚热带的多水塘密集小流域中,通过对超1400个水塘在斑块类型水平下的景观格局指数(如面积、边缘、形状等类型的指数)剖析,结果显示斑块面积指数和欧式最近临域距离指数与流域遗留磷流失量间显著负相关,以此证明面积较大且分散的多水塘对磷的滞留效果最为明显<sup>[44]</sup>。

## 2.2 基于水文过程的影响

水塘和沟渠中的水文过程不仅改变了磷的化学形态,还驱动磷在沟塘系统内发生时间和空间上的位移<sup>[45]</sup>,二者从流量、流速和流态等方面改变了集水区的水文过程,通过拦截径流减缓洪峰<sup>[46]</sup>,影响磷的纵向迁移路径,促进多水塘对磷的滞留作用,降低了磷向下游的输移通量。三峡库区箐林流域的多水塘在2012—2017年对径流深削减了19.1 mm/a<sup>[47]</sup>;暴雨事件时多水塘系统对径流量和洪峰值的削减率甚至高达90%和88.5%<sup>[48]</sup>,因此多水塘的水文过程可调控磷输移的驱动和载体。多水塘系统内部的沟塘结构也会影响其水文过程,进而影响磷输移。梯级串联式水塘间的高程差使水流传输产生坡度,水力状态的阶段式变化通过沟渠传递,上游水塘主要发挥减缓流速和改变流态的功能,下游水塘则提高了水力停留时间<sup>[49]</sup>,因此梯级串联模式带来的水文过程调控可增强多水塘系统对外源磷输入脉冲的耐受性。模拟这种多级水文调控过程需要精准表达水塘与水塘、水塘与河流间的填充溢流关系,体现多水塘系统的动态连通属性<sup>[17]</sup>。

## 2.3 基于生物地球化学过程的影响

陆域磷进入多水塘系统内会发生诸多生物地球化学过程:溶解态磷在系统中继续扩散输移,颗粒态磷则随悬浮泥沙运动进行输移转化。附着在细颗粒上的磷被输送至更远后沉降;粗颗粒携带的磷随水流逐渐沉降,被沉积相截留;一部分被截留的磷可通过沉积物再悬浮作用直接进入上覆水体成为颗粒态磷再次输移,也会在一定条件下(例如pH值、温度、溶解氧等环境因子的改变)解吸转化为可溶性磷进行输移<sup>[50]</sup>。沉积物对磷的截留与释放主要受控于吸附-解吸这一动态过程,因此可通过吸附量、吸附饱和度和吸附指数等描述并评估沉积磷的释放风险。Fu等<sup>[51]</sup>发现巢湖流域多水塘对磷的吸附量可高达974.1 mg/kg,且其中活性磷占绝大比例,释放风险高。李如忠等<sup>[52]</sup>基于磷吸附饱和度和吸附指数发现在全年75%的时间内,二十埠河源头区3条沟渠的沉积磷释放处于高风险水平。沟塘组合模式改变了沉积相中磷的形态分布特征,进一步增加了水-沉积物界面磷输移行为的复杂性。随着沟塘高程的降低,沉积物中铁结合态磷和氢氧化钠提取态磷占比有上升趋势<sup>[49]</sup>,裴婷婷等<sup>[53]</sup>的研究结果同样证明了下游水塘比上游水塘具有更高的沉积相全磷和溶解态无机磷持留量,表明下游水塘沉积磷释放风险更高。在多水塘系统中,部分磷在输移过程中会被生物吸收或发生降解,水生植物和微生物在其中扮演着重要角色。水生植物的生长会吸收根区附近的溶解态无机磷,由此产生的磷浓度梯度又促进了沉积物对磷的吸附<sup>[54]</sup>;水生植物根系密布也可减缓流速并促进颗粒态磷的沉降;根系周围形成的微氧环境也为微生物提供了适应的生境,促进微生物通过氧化、还原和合成等作用参与沟塘环境中的生化反应过程(如矿化作用、同化作用、生物降解等),从而促进磷的吸收、利用和转化,影响磷的输移通量<sup>[55]</sup>。当前在流域尺度下量化沟塘磷输移的模拟方法多基于衰减系数<sup>[40]</sup>,还需加强上

述复杂过程及其内在耦合作用的表达和尺度扩展,以提升相关模型的适用性。

### 3 水文连通变化对磷输移的影响

#### 3.1 水文连通变化通过驱动干湿交替影响磷输移

多水塘系统的水文连通状态(连通、非连通、强连通或弱连通)处于动态变化之中。Li等<sup>[4]</sup>通过1 a内水塘蓄水量与产流量的关系得出,稻季时有17.8%的水塘在降水径流的驱动下呈现连通状态,麦季时连通的水塘比例降至4.0%。Yin等<sup>[56]</sup>发现多水塘系统的径流模式包括连续流和间断流,连续流的发生使流域内24个水塘在4次降水事件中实现完全连通;间断流时多为弱连通和非连通状态。水文连通的这种变化会驱动沟塘环境的干湿交替而影响磷输移过程。

沉积物淹水状态是干湿交替的直观表现,干湿交替引发的水分变化通过影响沉积物团聚体形成进而影响磷的流失<sup>[57]</sup>。淹水过程比落干过程更易破坏团聚体的数量、结构和水稳性,使团聚体崩解而比表面积变大,破坏了Fe、Al等有机化合物之间的结合键,形成新的吸附位点而使沉积物对磷的截留能力提升<sup>[58]</sup>。控制沉积物与水的接触方式、时长与频次均可有效发挥沟塘磷截留功能<sup>[59]</sup>。相关研究从生物和非生物层面解释了干湿交替对沉积物中磷输移的影响机制。一方面,落干初期的好氧环境促进微生物生长及磷富集,落干后期微生物则因过度脱水而死亡并释放磷;另一方面,淹水过程导致部分微生物细胞破裂释放有机磷,而部分微生物适应周期性干湿交替后存活并截留部分磷<sup>[58]</sup>。从非生物角度来看,淹水过程降低了沉积物表层氧化还原电位,有助于 $\text{Fe}^{3+}$ 向 $\text{Fe}^{2+}$ 转化并促进Fe-P还原和弱吸附态磷解吸,沉积物释磷潜力增加<sup>[60]</sup>。上覆水pH值也随着干湿交替过程而变化,当pH值升高时,离子交换过程频繁, $\text{OH}^-$ 与铁铝胶合体中的磷酸盐发生交换,增加了沉积磷垂向释放速率<sup>[61]</sup>。此外,水文连通变化可通过改变水沙条件对磷输移通量产生影响。周期性淹水落干过程中水土比变化迅速,磷向下游的输移通量随之改变。水文连通变弱时,磷向下游的输移通量随泥沙减少而降低,但又会因泥沙减少使水体颗粒磷吸附和固持能力减弱造成磷向水体流失<sup>[62]</sup>。

#### 3.2 水文连通变化通过改变水分滞留时间影响磷输移

水文连通变化对磷输移影响还可通过改变水分滞留时间实现。Stachelek等<sup>[63]</sup>采用基于水分滞留时间的Vollenweider经验方程,在国家尺度模拟了不同水文连通状态下129个湖泊的磷滞留效率,结果证明了水分滞留时间对磷截留的正向影响,且相对于湖泊与河流之间的水文连通,湖泊与湖泊之间水文连通的影响更强,这也为研究水塘与河流以及水塘与水塘间水文连通的生态环境效应提供了参考。

水塘和沟渠可被视为磷自陆域向河流输移过程中的“反应器”,磷充分发生生物地球化学反应需要一定的时间,反应强度与水文连通、外源输入和水分滞留时间密切相关<sup>[6]</sup>。进入多水塘系统的外源磷随着水文连通性( $\theta$ )增强而增加,在水文连通性由弱变强的前期阶段,水分滞留时间充足,磷与生物地球化学基质充分接触发生反应而被降减,此时系统内滞留效率( $\eta$ )主要受外源磷输入限制,且磷在上覆水-沉积物界面的垂向输移过程较强;当水文连通性继续增强,水分滞留时间减少而使磷发生垂向输移的潜能不足,磷主要通过平流扩散而纵向输运,此时滞留效率受限于水分滞留时间。若定义 $\eta_c$ 为滞留效率的目标值,则对应的水文连通性区间 $[\theta_{c1}, \theta_{c2}]$ 即为“有效”水文连通(图4)。基于上述理念,Murray等<sup>[10]</sup>针对水塘构建了上覆水-沉积物界面反应强度指数,以此评价了水文连通变化对多水塘源汇功能转换的影响,大部分监测数据表明水塘对营养盐的高效滞留与中等强度水文连通性趋于一致。

从广义概念来看,沟塘水分滞留时间可基于蓄水容积和进水流量估算,也可通过示踪试验测定。Ulrich等<sup>[33]</sup>通过易溶无机盐类示踪剂和荧光染料示踪剂的瞬时投放试验测定了水塘在瞬变流情景下的水分滞留时间及其分布。刘超等<sup>[64]</sup>利用恒速连续投加示踪试验,通过溶质浓度—时间穿透曲线获得源头沟渠的水文参数,为定量区分磷酸盐滞留贡献率提供支撑。因此,水分滞留时间可作为参量以评估水文连通变化对磷输移的影响<sup>[65-66]</sup>,例如,达姆科勒准数(Damköhler number,  $D_a$ )可表征磷在沟塘系统中反应速率与滞留(传输)速

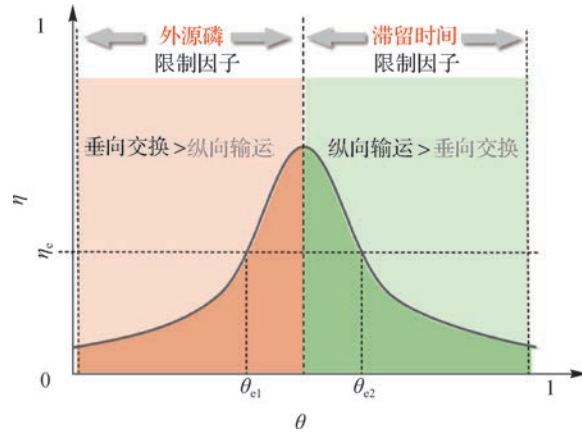


图4 水文连通强度与磷滞留效率的关系

Fig.4 Relationship between hydrological connectivity and phosphorus retention efficiency

率的比值。较低的  $D_a$  值表明磷在连通路径之间的反应强度较低，因此沟塘系统对磷的滞留效率较低；相反，较高的  $D_a$  值表明较高的滞留效率。综合来看，多水塘系统内磷的输移具有纵向和垂向特性，水分滞留时间作为重要影响因子能够以半定量的形式表征水文连通对其二维联动过程的影响。

## 4 结论和展望

本文梳理了该主题研究的逻辑框架，尽管多水塘的水文连通性评估和磷在沟塘内的输移研究已取得一定进展，但多水塘系统内磷输移过程与通量仍缺乏有效的动态模拟和动力学机制研究，尚未完全明确多水塘系统水力联系后多因子耦合作用下的磷输移机理，还需深入挖掘多水塘系统水文连通对磷输移的影响机制。基于目前已有成果和现存问题，未来该领域的发展动向建议关注以下方面：

(1) 多水塘系统水文连通变化的驱动机制。受气候变化、农业集约化、城市化发展等影响，部分地区水塘数量消减、面积萎缩且功能转换，沟渠也呈破碎化和硬质化发展，在结构和功能层面上导致多水塘系统水文连通性的剧烈变化，需要融合观测、遥感和模型等多技术手段探明这种变化的驱动机制。

(2) 沟塘滞留效率的尺度扩展。沟塘对营养盐截留及释放的研究通常基于实地监测或室内试验获得，如何构建具有物理机制的尺度转换方法，将田间尺度下的沟塘滞留参量扩展至流域尺度，是科学评估多水塘系统环境效应的挑战。

(3) 定量模拟和优化调控。强化不同连通路径、频率和强度对营养盐迁移转化影响的机理表述，改进或开发多水塘系统污染输移模型，提升多水塘系统环境效应的定量模拟。此外，沟塘位置、大小和连通结构等影响流域氮磷入河污染通量，需要构建以面源污染管控为目标的多水塘优化调控技术，切实服务多水塘修缮、改造和建设。

### 参考文献：

- [1] SCHMADEL N M, HARVEY J W, ALEXANDER R B, et al. Thresholds of lake and reservoir connectivity in river networks control nitrogen removal[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2779.
- [2] VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKELL D A, et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(18): 6396-6402.
- [3] YIN C Q, ZHAO M, JIN W G, et al. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 251(1/2/3): 321-329.
- [4] LI Y F, WU Y Q, WRIGHT A, et al. Integrated factor analysis of water level variation in geographically isolated ponds[J]. *Envi-*

- ronmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(31): 38861-38870.
- [5] 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 等. 农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4999-5006. (LI Y F, LIU H Y, LIU J Z, et al. Effect of different multi-pond network landscape structures on nitrogen retention over agricultural watersheds[J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 4999-5006. (in Chinese))
- [6] WEGENER P, COVINO T, WOHL E. Beaver-mediated lateral hydrologic connectivity, fluvial carbon and nutrient flux, and aquatic ecosystem metabolism[J]. Water Resources Research, 2017, 53(6): 4606-4623.
- [7] ZHANG D, WANG K H, ZHANG G X, et al. Ecological engineering practice of cascade-pond system: water purification and biodiversity conservation[J]. Ecological Engineering, 2022, 179: 106632.
- [8] STACKPOOLE S M, STETS E G, SPRAGUE L A. Variable impacts of contemporary versus legacy agricultural phosphorus on US river water quality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(41): 20562-20567.
- [9] ALEWELL C, RINGEVAL B, BALLABIO C, et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion[J]. Nature Communications, 2020, 11: 4546.
- [10] MURRAY D, NEILSON B T, BRAHNEY J. Source or sink? Quantifying beaver pond influence on non-point source pollutant transport in the intermountain west[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285: 112127.
- [11] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 112-122. (LIU J T, HAN X L, LIU J L, et al. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: a review[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 112-122. (in Chinese))
- [12] LI Y L, TAN Z Q, ZHANG Q, et al. Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: framework and implications for eco-environmental assessments[J]. Water Research, 2021, 195: 117005.
- [13] CHEN W J, HE B, NOVER D, et al. Farm ponds in Southern China: challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 1322-1334.
- [14] 周俊, 邓伟, 刘伟龙. 沟渠湿地的水文和生态环境效应研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1079-1083. (ZHOU J, DENG W, LIU W L. Advances on the effects of ditch wetland on hydrology and eco-environment[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(10): 1079-1083. (in Chinese))
- [15] 张芳. 中国古代淮河、汉水流域的陂渠串联工程技术[J]. 中国农史, 2000, 19(1): 22-27. (ZHANG F. Agricultural economy of the eastern part of Yangzi-Huai valley in the Neolithic Age[J]. Agricultural History of China, 2000, 19(1): 22-27. (in Chinese))
- [16] 何奕忻, 蒋海波, 张运春, 等. 基于 CiteSpace 的小微湿地文献计量分析[J]. 生态学报, 42(13): 5516-5530. (HE Y X, JIANG H B, ZHANG Y C, et al. Bibliometrics analysis of small and micro wetlands based on CiteSpace[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5516-5530. (in Chinese))
- [17] CHEN W J, NOVER D, YEN H, et al. Exploring the multiscale hydrologic regulation of multipond systems in a humid agricultural catchment[J]. Water Research, 2020, 184: 115987.
- [18] HUANG S L, LEE Y C, BUDD W W, et al. Analysis of changes in farm pond network connectivity in the peri-urban landscape of the Taoyuan area, Taiwan[J]. Environmental Management, 2012, 49(4): 915-928.
- [19] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6280-6291. (LI Y Y, YOU L L, CHEN Y S, et al. Spatial-temporal characteristics of multi-pond landscape change and their driving factors in the Chaohu basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 6280-6291. (in Chinese))
- [20] BRACKEN L J, WAINWRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 119: 17-34.
- [21] 陈森林, 毛玉鑫, 李丹, 等. 基于逻辑规范的水系连通定义及分类[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 890-902. (CHEN S L, MAO Y X, LI D, et al. Research on the definition and classification of interconnected water systems based on logic norms[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 890-902. (in Chinese))
- [22] 吴燕锋, 章光新. 流域湿地水文调蓄功能研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 458-469. (WU Y F, ZHANG G X. A review of hydrological regulation functions of watershed wetlands[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 458-469. (in Chinese))
- [23] KANG S R, KING S L. Effects of hydrologic connectivity on pond environmental characteristics in a coastal marsh system[J].



- Southeastern Naturalist, 2013, 12(3): 568-578.
- [24] 罗纨, 朱金城, 贾忠华, 等. 排水沟塘分布特性及与农田水力联系对水质净化能力的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 161-167. (LUO W, ZHU J C, JIA Z H, et al. Effect of distribution characteristic and field hydraulic connection of drainage ditches and ponds on water quality purification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 161-167. (in Chinese))
- [25] BRANNEN R, SPENCE C, IRESON A. Influence of shallow groundwater-surface water interactions on the hydrological connectivity and water budget of a wetland complex[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(18): 3862-3877.
- [26] COHEN M J, CREED I F, ALEXANDER L, et al. Do geographically isolated wetlands influence landscape functions? [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(8): 1978-1986.
- [27] 皋鹏飞, 李玉凤, 刘红玉, 等. 基于微地形的南方沟-塘湿地系统景观异质性研究: 以风岭流域为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2016, 39(2): 112-119. (GAO P F, LI Y F, LIU H Y, et al. Study of the south ditch-pond wetland landscape heterogeneity based on micro-topography: a case study of fengling watershed[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2016, 39(2): 112-119. (in Chinese))
- [28] LI Y F, WRIGHT A, LIU H Y, et al. Land use pattern, irrigation, and fertilization effects of rice-wheat rotation on water quality of ponds by using self-organizing map in agricultural watersheds[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 272: 155-164.
- [29] 吴玉琴, 邱春琦, 徐嘉仪, 等. 苏北平原灌区小水利工程对沟渠水文连通结构的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1653-1662. (WU Y Q, QIU C Q, XU J Y, et al. Effects of small irrigation facilities on hydrological connectivity of ditches in North Jiangsu Plain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1653-1662. (in Chinese))
- [30] LÜ M Q, MA M H, WANG Y, et al. Functions of traditional ponds in altering sediment budgets in the hilly area of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 537-549.
- [31] 谢先红, 崔远来, 蔡学良. 灌区塘堰分布分形描述[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 858-863. (XIE X H, CUI Y L, CAI X L. On fractal description of ponds distribution in irrigation system[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 858-863. (in Chinese))
- [32] 窦明, 宋孙娟, 石亚欣, 等. 结构-功能耦合下的城市水系连通方案两阶段优化[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 79-90. (DOU M, SONG S J, SHI Y X, et al. Two-stage optimization of urban water system connectivity scheme under structure-function coupling[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 79-90. (in Chinese))
- [33] ULRICH U, LANGE J, PFANNERSTILL M, et al. Hydrological tracers, the herbicide metazachlor and its transformation products in a retention pond during transient flow conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(26): 26706-26720.
- [34] 徐嘉仪, 李玉凤, 邱春琦, 等. 基于水体盐度和水文结构的滨海湿地海陆水文连通性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1643-1652. (XU J Y, LI Y F, QIU C Q, et al. Sea-land hydrological connectivity of coastal wetlands based on water salinity and hydrological structure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1643-1652. (in Chinese))
- [35] THORNHILL I, BATTY L, HEWITT M, et al. The application of graph theory and percolation analysis for assessing change in the spatial configuration of pond networks[J]. Urban Ecosystems, 2018, 21(2): 213-225.
- [36] GUILLON S, THOREL M, FLIPO N, et al. Functional classification of artificial alluvial ponds driven by connectivity with the river: consequences for restoration[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 394-403.
- [37] LI Y F, XU J Y, WRIGHT A, et al. Integrating two aspects analysis of hydrological connectivity based on structure and process to support muddy coastal restoration[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108416.
- [38] BROOKS A C, COVINO T, HALL E K. Evaluating spatial and temporal dynamics of river-floodplain surface water connectivity using hydrometric, geochemical and microbial indicators[J]. Water Resources Research, 2022, 58(5): e2021WR030336.
- [39] LI S S, LIU H B, ZHANG L, et al. Potential nutrient removal function of naturally existed ditches and ponds in paddy regions: prospect of enhancing water quality by irrigation and drainage management [J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137418.
- [40] SUN C, CHEN L, LIU H B, et al. New modeling framework for describing the pollutant transport and removal of ditch-pond system in an agricultural catchment[J]. Water Resources Research, 2021, 57(12): e2021WR031077.

- [41] CHEN W J, NOVER D, XIA Y Q, et al. Assessment of extrinsic and intrinsic influences on water quality variation in subtropical agricultural multipond systems[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 276: 116689.
- [42] MOLONEY T, FENTON O, DALY K. Ranking connectivity risk for phosphorus loss along agricultural drainage ditches[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134556.
- [43] 乔郭亮, 周寅康, 顾铮鸣, 等. 苏南地区景观格局特征与坑塘水质关联关系[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 224-234. (QIAO G L, ZHOU Y K, GU Z M, et al. Analysis of the linkage between landscape pattern and the water quality of ponds in Southern Jiangsu of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(10): 224-234. (in Chinese))
- [44] MENG C, LIU H Y, LI Y Y, et al. Landscape patterns of catchment and land-use regulate legacy phosphorus releases in subtropical mixed agricultural and woodland catchments[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150055.
- [45] HUA L L, ZHAI L M, LIU J, et al. Effect of irrigation-drainage unit on phosphorus interception in paddy field system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 319-327.
- [46] LIU L H, WEI O Y, LIU H B, et al. Drainage optimization of paddy field watershed for diffuse phosphorus pollution control and sustainable agricultural development[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107238.
- [47] 吕明权. 三峡库区池塘系统的环境效应及空间配置研究: 以箐林溪为例[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2018. (LYU M Q. Environmental effects and spatial allocation of pond system in Three Gorges Reservoir area: a case study of Jinglinxi watershed[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese))
- [48] 毛战坡, 尹澄清, 单宝庆, 等. 水塘系统对农业流域水资源调控的定量化研究[J]. *水利学报*, 2003, 34(12): 76-83. (MAO Z P, YIN C Q, SHAN B Q, et al. Regulation function of multi-pond system for water resources in a watershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(12): 76-83. (in Chinese))
- [49] 范成新, 汪家权, 羊向东. 巢湖磷本底影响及其控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. (FAN C X, WANG J Q, YANG X D. Background phosphorus in Lake Chaohu: the environmental effect and its control[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2012. (in Chinese))
- [50] FROST P C, PRATER C, SCOTT A B, et al. Mobility and bioavailability of sediment phosphorus in urban stormwater ponds[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 3680-3688.
- [51] FU Q, YIN C Q, SHAN B Q. Phosphorus sorption capacities in a headstream landscape: the pond chain structure[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1004-1011.
- [52] 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 等. 不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3375-3383. (LI R Z, QIN R B, HUANG Q F, et al. Fractions and release risk of phosphorus in surface sediments of three headwater streams with different styles of water supply[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3375-3383. (in Chinese))
- [53] 裴婷婷, 李如忠, 高苏蒂, 等. 合肥城郊典型农田溪流水系统沉积物磷形态及释放风险分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 548-557. (PEI T T, LI R Z, GAO S D, et al. Phosphorus fractions and release risk in surface sediments of an agricultural headwater stream system in Hefei suburban, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 548-557. (in Chinese))
- [54] MA L, HE F, HUANG T, et al. Nitrogen and phosphorus transformations and balance in a pond-ditch circulation system for rural polluted water treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 117-126.
- [55] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 农田排水沟渠中氮磷迁移转化及净化措施研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(10): 10-13, 17. (MA F F, XING S L, GAN M Q, et al. Migration and transformation of nitrogen and phosphorus and purification measures in farmland drainage ditch[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(10): 10-13, 17. (in Chinese))
- [56] YIN C Q, SHAN B Q. Multipond systems: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *Ambio*, 2001, 30(6): 369-375.
- [57] 王子琬, 梁新强. 土壤干湿交替对磷素释放的影响机制[J]. *环境生态学*, 2020, 2(5): 54-58. (WANG Z W, LIANG X Q. Effects of alternate drying-rewetting process on migration and transformation of soil phosphorus[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(5): 54-58. (in Chinese))
- [58] 任文畅, 王沛芳, 钱进, 等. 干湿交替对土壤磷素迁移转化影响的研究综述[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(5): 41-47. (REN W C, WANG P F, QIAN J, et al. Review of the effect of drying-rewetting alternation on the transportation and transformation of soil phosphorus[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(5): 41-47. (in Chinese))

- [59] 汤爱萍. 小流域农业非点源污染物磷迁移转化过程及控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015. (TANG A P. Study on transformation and control of phosphorus from agricultural non-point source in small watershed[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. (in Chinese))
- [60] 高丽, 杨浩, 周健民. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展[J]. 土壤, 2004, 36(1): 12-15, 36. (GAO L, YANG H, ZHOU J M. Research progress on phosphorus release from lake sediments[J]. Soils, 2004, 36(1): 12-15, 36. (in Chinese))
- [61] 张义, 刘子森, 张垚磊, 等. 环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响[J]. 水生生物学报, 2017, 41(6): 1354-1361. (ZHANG Y, LIU Z S, ZHANG Y L, et al. Effects of varying environmental conditions on release of sediment phosphorus in West Lake, Hangzhou, China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(6): 1354-1361. (in Chinese))
- [62] 周建军, 张曼, 李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 865-880. (ZHOU J J, ZHANG M, LI Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 865-880. (in Chinese))
- [63] STACHELEK J, SORANNO P A. Does freshwater connectivity influence phosphorus retention in lakes? [J]. Limnology and Oceanography, 2019, 64(4): 1586-1599.
- [64] 刘超, 李如忠, 傅扬. 溪流营养盐滞留的水文与非水文过程分析方法[J]. 环境科学学报, 2022, 42(5): 374-383. (LIU C, LI R Z, FU Y. Method of analysis on nutrient retention of hydrological and non-hydrological processes in a headwater stream [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(5): 374-383. (in Chinese))
- [65] ALI G, OSWALD C, SPENCE C, et al. The T-TEL method for assessing water, sediment, and chemical connectivity[J]. Water Resources Research, 2018, 54(2): 634-662.
- [66] HARVEY J, GOMEZ-VELEZ J, SCHMADEL N, et al. How hydrologic connectivity regulates water quality in river corridors[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2019, 55(2): 369-381.

## Hydrological connectivity in multi-pond systems and its impact on phosphorus transport: research progress and perspectives\*

XIE Hui<sup>1</sup>, DONG Jianwei<sup>2</sup>, LI Yufeng<sup>2</sup>, SHANG Meiqi<sup>2</sup>, LAI Xijun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Multi-pond systems are common small-scale water conservancy projects in agricultural watersheds. The spatially interlaced structure of pond-ditches leads to complex and variable processes of hydrological connectivity, which is of great importance to source reduction and pollution control for watershed nutrients. To better understand the impact of hydrological connectivity on phosphorus transport in multi-pond systems, we summarize assessment methods of hydrological connectivity index in multi-pond systems based on the definition and connotation of multi-pond systems and hydrological connectivity. Landscape patterns, hydrological processes, and biogeochemical processes play an important role in regulating phosphorus transport in multi-pond systems. The impacts of hydrological connectivity on phosphorus transport environment through driving drying-wetting cycles and on phosphorus transport flux by changing water residence time are illustrated. We point out that the driving mechanism of hydrological connectivity changes, scale extension of nutrient retention efficiency, quantitative simulation, and optimal regulation are important directions for future research on the environmental effects of multi-pond systems. This review will provide a theoretical basis for ensuring the water quality improvement function of multi-pond systems.

**Key words:** multi-pond; hydrological connectivity; nonpoint source pollution; sediment; phosphorus

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42007362) and the National Key R&D Program of China (No. 2021YFD1700600).