

DOI: 10.5846/stxb202011162948

郭二辉, 樊子豪, 张瑞香, 孙金华, 杨喜田. 河岸带生态系统植被与土壤对水文变化的响应研究进展. 生态学报, 2021, 41(23): 9164-9173.

Guo E H, Fan Z H, Zhang R X, Sun J H, Yang X T. Research progresses on the response of vegetation and soil to hydrological changes in riparian ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9164-9173.

# 河岸带生态系统植被与土壤对水文变化的响应研究进展

郭二辉, 樊子豪, 张瑞香, 孙金华\*, 杨喜田

河南农业大学林学院, 郑州 450002

**摘要:** 河岸带的植被与土壤是生态系统重要组成部分, 对于维持河岸带的生态健康、生态系统服务与可持续性具有至关重要的作用。水文变化是河岸带生态系统的首要干扰因子, 系统总结了水文变化对河岸带植被的特征以及植被形态、群落分布、繁殖、生存策略的影响, 并阐述了河岸带水文和植被对土壤氮磷迁移转化的影响机制。根系作为土壤与植物地上部分之间物质、能量流动与信号传导的关键纽带, 目前对根系的研究还较欠缺, 需要加强水文变化对河岸带湿地植物根系形态、结构、功能特征的影响机理研究, 以及湿地植物对水文变化的适应机制和耐受阈值方面的探究。在微观方面, 应加强水文变化与植被等多因素耦合对土壤氮磷迁移转化过程的机理研究。河流形态和土壤的多样性决定着河岸带水文作用特征的复杂性, 今后需注重河岸带个性特征与水文响应的关系研究。河岸带是横向的水陆生态过渡带和河流上下游的纵向生态廊道, 亟需综合考虑和模拟流域土壤、植被与水文、人类活动之间的耦合关系, 预测未来气候与社会经济情境下的河岸带生态系统演变规律, 为河岸带生态系统的生态调节、生物多样性保护与生态恢复等提供理论依据与技术支持。

**关键词:** 河岸带; 植被生理生态; 土壤氮; 土壤磷; 水文变化

## Research progresses on the response of vegetation and soil to hydrological changes in riparian ecosystems

GUO Erhui, FAN Zihao, ZHANG Ruixiang, SUN Jinhua\*, YANG Xitian

College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** The vegetation and soil in the riparian zone are the key elements of the ecosystem, which greatly contribute to maintaining the ecological health, systematical service and sustainability of the riparian zone. The hydrological change is the main influence factor to the riparian ecosystem. This paper summarized the impacts of hydrological changes on the morphology, reproduction, community distribution, survival strategies of riparian vegetation, by describing the mechanism of soil nitrogen and phosphorus transfer cycles and enrichment migration and transformation under the hydrological effect. At present, the research of hydrological changes on riparian wetland plants is mainly based on the above-ground parts of plants such as plants morphology, physiology and ecology, community distribution and succession, however, the research on the morphological, structural, and functional characteristics of the root system is relatively weak. While the root system plays an essential role in the transmission of the material, energy and signal between the soil and above-ground part of the plant, the related research is still insufficient. It is vital to increase the research on the influence mechanism of hydrological changes to the morphological, structural and functional characteristics of riparian wetland plant roots, as well as the adaptive

基金项目: 河南省青年人才托举工程项目(2019HYTP013); 公路交通环境保护技术交通运输行业重点实验室开放基金课题(2018)

收稿日期: 2020-11-16; 网络出版日期: 2021-07-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunjinhua\_zgkd@163.com

mechanism and tolerance threshold of wetland plants to the hydrological changes. Besides, the study of the mechanism of hydrological changes on the transfer and transformation of soil nitrogen and phosphorus in microscopic aspect should also be strengthened. The influence and the control methods of soil adsorption, plant absorption, and denitrification on the process of nitrogen interception and transformation under the unique hydrological environment of the riparian zone should also be clarified; it is necessary to study in depth and simulation the law of migration cycle of the form and quantity of phosphorus in different media of riparian plants, soil and water. River morphology and the diversity of soil determines the complexity of the hydrological characteristics of the riparian zone. In the future, it is necessary to focus on the study of the relationship between the individual characteristics of the riparian zone and the hydrological response. The riparian zone is the water-land ecological transition zone in horizontal view and the ecological corridor between the upstream and downstream of the river in vertical view. Thus, it is necessary to take the relationship between watershed soil, substitution, topography, hydrology, and human activities into consideration and simulation; predict the changing pattern of the riparian ecosystem in the future climate and socio-economic scenarios to provide the theoretical basis and technical support for the ecological adjustment, biological protection and ecological restoration of the riparian ecosystem.

**Key Words:** riparian zone; vegetation physiology and ecology; soil nitrogen; soil phosphorus; hydrological change

河岸带又称河岸缓冲带,是指水陆交界区的两侧,受河流影响直至消失的地带,具有独特性、动态性和边缘效应,是水陆物种源和野生动植物的重要栖息地<sup>[1]</sup>。河岸带是湿地生态系统的一种重要类型,可为人类提供重要的生态系统服务,例如调蓄洪水、调节气候、碳固定、净化污染和生物多样性维护、文化旅游等<sup>[2-4]</sup>。河岸带所占的景观面积小,但支持的生态系统服务价值高,是全球生态恢复研究的热点区域<sup>[5]</sup>。水文过程指湿地水资源的动态迁移过程<sup>[6]</sup>,可以通过水文情势来表达,它不仅是湿地植被分布与组成的前提条件,也是湿地生态环境演变的重要影响因素。在湿地恢复、重建与管理过程中,水文条件也被认为是可控的、最直接有效的环境条件<sup>[7]</sup>。水文变化是河岸带湿地生物组成的关键生态因子,对湿地生态系统的相对重要性超过 50%,对于维持湿地生态系统的养分循环、能量流动和生态系统服务具有重要的意义,湿地水文对气候变化也有极高的敏感性和反馈作用<sup>[5,8-9]</sup>。河流的水文过程也是塑造河岸带湿地生境复杂性和维持物种多样性的重要生态因子<sup>[10]</sup>,深入理解河岸带生态系统对水文变化的响应对于保护和恢复河岸带湿地至关重要。

水文变化会导致河岸带湿地植被与土壤等生态因子的变异,进而影响到河岸带生态系统的结构与生态系统服务。水文条件的改变不仅直接影响植物的形态、生长发育、多样性、繁殖和生存策略,并最终影响群落的形成和演替以及生态系统的结构和功能,是湿地生态系统的关键影响因素<sup>[6,11-12]</sup>,而河岸带植被的群落结构和演替也会影响到水文过程的异质性<sup>[13]</sup>。水文变化还是河岸带土壤氮磷迁移转化及截留、养分循环的关键影响因素。本文概述了水文变化对河岸带植被和土壤氮磷迁移循环的影响机制,可以为河岸带生态系统的植被恢复以及生态系统服务提升提供科学依据。

## 1 河岸带特征与生态系统服务

河岸带植被与土壤是河岸带生态系统的重要组成部分,承载着多种生态系统服务。

### 1.1 河岸带生态系统的特征

(1)河岸带植被存在于河流两侧,通常呈现狭长状;(2)河岸带是周边陆地与河流生态系统进行物质、能量和生物迁移的过渡带;(3)河岸带的宽度以及地貌都会影响植物群落组成、结构以及空间分布特征。河流的年际和季节性水文干扰会改变河岸带土壤的水分含量和微地形地貌特征,影响植被的分布、组成与演替;(4)河岸带将河流的上下游连接为一体形成生态廊道<sup>[14]</sup>。流域的气候、地形地貌、土壤、水文以及干扰等共同影响河岸带植被的种类组成、群落结构及生产力<sup>[15]</sup>。

## 1.2 河岸带的主要生态系统服务

(1)物种源和栖息地:河岸带生态系统由于其独特的地理位置,蕴含着丰富的动植物种类,许多研究表明河岸带物种种类较其他生态系统高。美国西部河岸带的研究发现,虽然河岸带只占据了全部景观的10%至15%,但却占据了全部物种的70%至80%,Kauffman在美国的俄勒冈州和华盛顿对动植物的统计学研究表明,在常见的593种动植物中约有319种与河岸带生态系统相关<sup>[16]</sup>。

(2)气候调节功能:河岸带植被可以通过蒸腾作用、对太阳入射光的截留和夜晚长波辐射的流失,直接或间接的影响河流的温度和区域气候环境<sup>[17-19]</sup>。河岸带植被的结构特征如走向、宽度、高度、密度、盖度及其林冠的垂直结构都影响河岸带生态系统的小气候,并为许多珍稀的生物提供栖息和生存繁殖的环境<sup>[17]</sup>。

(3)养分以及能量源:河岸带植被以及相邻的陆地生态系统向河流输入的大量枯枝落叶、果实等经过分解成为河流中生物的主要能量来源,直接控制河流生态系统的生产力。

(4)过滤与净化功能:河岸带植被与土壤可以过滤、调节和转化由陆地生态系统流向河流的有机物和无机物,进一步影响营养元素、泥沙以及化学物质等含量的空间分布。

(5)固碳功能:湿地是地球上最重要的碳库之一,具有固碳能力强、沉积速率高、碳埋藏速率高等特点,湿地植物残体以沉积物的形式进行储存固定,并进行碳循环过程<sup>[20]</sup>。

(6)水土保持功能:河岸带乔灌木植物根系可固着土壤,提高土壤持水性,改善土壤结构与性能,提高河岸的抗侵蚀能力和抗冲刷能力。

(7)其他功能:河岸带植被还有休闲娱乐与精神文化方面的功能,同时由于水分充足,地势平坦,河岸带区域还是农林牧渔业的生产基地。

## 2 河岸带植被对水文变化的响应

河岸带是介于河流和高地植被之间的典型生态过渡带,具有地形复杂、生境多样化、丰富的生物多样性和明显的边缘效应,也是受水环境和人类活动干扰强烈影响的生态交错区<sup>[2]</sup>。由于水文变化和人类干扰的影响,河岸带植被的时空演变和空间格局呈现出复杂多变的动态特征,河岸植被结构和组成的变化可以通过多种途径影响河岸生态系统服务能力<sup>[21-24]</sup>。其中水文条件是影响河岸带植被群落演替和格局的重要因素,也是河岸带生物地球化学循环的关键制约因子<sup>[25-26]</sup>。

### 2.1 地下水位变化对河岸带植被分布与生理生态的影响

河岸带湿地植物的光合生理、生物量、群落构成和功能性状等都会受到地下水位的影响<sup>[27-28]</sup>。地下水位变化的持续时间与过程是影响湿地植物生长发育与繁殖的关键因素。

(1)植物分布与群落构成:水文是湿地植物群落进化的主要驱动力,并可能导致植被群落的分布模式产生变化<sup>[29-31]</sup>。许多研究表明地下水位的下降、土壤盐分动态会使植物群落类型、构成及空间分布发生变化<sup>[32-33]</sup>。地下水位较浅会造成土壤水分含量过高,植物种类分布一般为耐缺氧型植物;而地下水位变深,植物种类则由湿生植物逐渐演替为耐旱型植物<sup>[27]</sup>。葛振鸣对崇明东滩湿地的研究发现,地下水位下降后以湿生植物芦苇为优势种(*Phragmites australis*)的群落逐渐演替为中生植物甚至旱生植物<sup>[34]</sup>。张琳的研究表明随地下水位梯度的降低,柳湾林群丛类型由乌柳+中国沙棘群丛向北沙柳群丛过渡,物种丰富度、均匀度指数等均呈明显下降趋势<sup>[35]</sup>。

(2)植物生物量与功能性状的变化:地下水位的高低会影响植物生物量以及植物功能性状。朱丽等在海流兔河域的研究中发现植物的地上和地下生物量并不是线性的,而是存在一个最适水位,在最适水位上下波动都会导致生物量的减少<sup>[36]</sup>。Kennedy对五种湿地植物进行研究,发现地下水位的变化对不同物种的分蘖数、形态和生物量等都有明显的影响<sup>[37]</sup>。刘玉等的研究表明,芦苇的株高、茎粗和分蘖对地下水位有不同的响应,地下水位越低,芦苇株高越高,同时叶面积、叶长、叶宽显著减小<sup>[38]</sup>。

(3)植物光合生理的影响:地下水位的变化会导致河岸带湿地土壤的淹没程度和土壤的水饱和度发生变

化,从而影响植物的光合特性。地下水位变化会使植物因本身特性和环境等因素共同作用而导致光合生理过程受到影响<sup>[39]</sup>。短期淹水胁迫可能造成植物气孔关闭,限制了 CO<sub>2</sub> 进入叶片,进而降低植物叶片光合能力的下降,或者是通过功能性状的改变使其光合能力受到抑制<sup>[40]</sup>。谢涛对芦苇 (*Phragmites australis*) 的研究中发现过低的土壤水分可能会引起其叶片气孔受到限制而抑制其光合作用<sup>[41]</sup>。除此之外,水淹会降低湿地植物 PS II 光化学效率以及电子传递速率,从而影响植物的光合速率<sup>[42-43]</sup>。而地下水位下降不仅降低了土壤含氧量,同时也会降低土壤有机质的矿化速度<sup>[44]</sup>,进而通过影响土壤氮含量而使植物光合发生变化。

## 2.2 地表水位变化对河岸带湿地植被的影响

地表水位的季节波动和年际变化是河岸带湿地生态系统的重要表征,河流水位的变化会直接影响河岸带土壤的干湿状态,水位过高会使土壤处于淹水状态,而水位过低则会使土壤处于一个相对干燥的状态,进而影响植物的生长发育、植被群落结构<sup>[45-46]</sup>,甚至影响植物的生存策略。

### 2.2.1 河岸带植被功能形状对地表水位变化的响应

植物可以通过改变植株分支数、株高、节间距和叶面积等功能性状适应极端水位胁迫环境<sup>[47]</sup>。如在鄱阳湖湿地的研究中发现,一些湿地植物通常会减小叶面积适应长期干旱胁迫<sup>[48]</sup>。有研究发现在三峡库区长期高水位运行的状态下会导致狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 产生更多的分株数,并且其分株的株高、茎宽和叶片数也受到抑制<sup>[49]</sup>。在亚马逊泛洪区的研究表明湿地植物对水淹的耐受能力对其生存和分布有显著的影响,当湿地长期处于丰水期时,能耐受长期淹水状态的植物可以在河岸滩上占据优势<sup>[50]</sup>。水深的增加会引发光照、风浪和底泥发生变化,进而影响植物的形态以及功能性状。植物对水深的响应机制主要体现在生物量的分配,在环境中植物可利用的资源是在不断变化的,植物通过调节生长和繁殖的资源分配来提高对环境的适应性,其比例的分配主要取决于生境中资源的可利用性,当环境恶劣时,植物会将更多的资源分配给能获取更高资源的营养结构<sup>[51-52]</sup>。但不同植物种类对水深的响应机制也不同。有研究表明在水位较高的情况下,芦苇 (*Phragmites australis*) 的株高、茎粗、盖度和生物量均为最高值<sup>[53]</sup>,而水位下降则增加了植物的密度和叶片数,从而影响其生产力<sup>[54]</sup>。毛苔草 (*Carex lasiocarpa*)<sup>[6]</sup>、美人蕉 (*Canna incida*)<sup>[55]</sup> 等植物株高随着水位的升高随之增高。而短尖苔草 (*Carex brevicuspis*) 的株高和总生物量则在低水位更高<sup>[56]</sup>,小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 的株高同样随水位升高而下降<sup>[6]</sup>。互花米草 (*Spartina alterniflora*) 和燕子花 (*Iris laevigata*) 的株高随水位的降低呈现先增加后降低的趋势<sup>[57-58]</sup>。

### 2.2.2 河岸带植被生存繁殖和分布对地表水位变化的响应

(1) 生存与繁殖的影响:河岸带湿地植物的生存和繁殖也会受到水位变化的响应。有研究表明香蒲 (*Typha domingensis*)、灰化苔草 (*Carex cinerascens*)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*) 和美人蕉 (*Canna incida*) 的分株数会随着水位的升高而减少<sup>[55-59]</sup>,短尖苔草 (*Carex brevicuspis*) 分株数以及总芽生物量等则随水位的下降而减少<sup>[56]</sup>。还有一些湿地植物例如荇菜 (*Nymphoides peltatum*) 和互花米草分别在水位变化至 20 cm 和 3 m 时繁殖遭到显著抑制<sup>[60-61]</sup>。

湿地植物通常会通过改变不同器官之间的资源分配来优化它们的资源获取策略,从而提高其对不同水位胁迫的适应能力<sup>[62]</sup>。在经常受到土壤淹水的状况下,一些植物会通过调整植株内部结构如改变通气组织大小<sup>[63]</sup>;一些湿地植物则形成了相应的形态以及生理生态适应机制,提高对土壤低氧水平的适应能力<sup>[64]</sup>。在极端的水位变化情况下如洪水淹没,会促使植物产生一系列生理和形态上的变化以适应极端环境下的光照和氧气等<sup>[65]</sup>,主要的生存策略为耐受和逃避两种适应策略。李文的研究发现灰化苔草 (*Carex cinerascens*) 在水淹胁迫环境下会把其生物量主要集中在地下部分维持生存并休眠,采取耐受策略;南荻 (*Miscanthus lutarioriparius*) 的生物量随着水淹程度增加而减少,当水位较浅时则株高随之升高,主要采取逃避策略<sup>[48]</sup>。

(2) 植被分布格局的影响:地表水位变化是造成河岸植被格局变化的主要原因。在三峡水库消落区的研究显示河岸带植物的种类与盖度与淹没梯度密切相关<sup>[66]</sup>。在三江平原湿地的研究也发现,不同植物对水位的敏感程度以及耐受性有明显差异,因而会在河岸带区域形成异质性的植被分配格局<sup>[67]</sup>。对瑞典北部 10 条

不同管制的河流研究表明,流量及水位的调节会导致木本、草本植物的相对丰度发生变化,并导致物种的群落组成受到影响,最终影响河岸地区的生态系统服务<sup>[68]</sup>。对鄱阳湖的研究表明,干旱年份的土壤养分和植物多样性明显低于洪水年份<sup>[69]</sup>。地表水位变化还可以通过改变光照条件、水透明度、营养物质等环境参数影响浮游植物的生长和分布<sup>[70]</sup>。

### 3 河岸带氮磷迁移转化过程对不同水文要素的响应

河岸带对氮磷养分迁移的截留转化是一系列非常复杂的生物地球化学过程,其迁移转化过程受河流水文变化、土壤特征、植被群落结构特征和地形地貌等综合因素的影响<sup>[24,71-75]</sup>。

#### 3.1 河岸带土壤氮磷元素迁移和截留转化机制

河岸带是土壤氮磷的重要源和汇,也是土壤养分累积、输送和再生的重要场所,显著影响着土壤氮磷的生物地球化学循环过程。氮素的输入形态主要是相邻高地上的溶解态氮、土壤颗粒吸附态氮及有机残体结合的氮素,河岸带地表径流中的氮素主要通过沉积、渗透等物理过程进行截留,渗透到土壤中的氮素,主要通过植物吸收、微生物转化、反硝化作用及土壤吸附等实现截留,其中植物吸收作用和反硝化作用是河岸缓冲带对氮素截留的主要机理<sup>[76-78]</sup>。磷素的输入主要是通过岩石的风化释放和凋落物归还到土壤。磷素在河岸带中的截留转化机制主要是:(1)植物对颗粒态磷的吸收;(2)土壤吸附或植物吸收保留溶解和胶体态 P。地表径流和壤中流形成过程中,水中颗粒或土壤对磷的吸附量增加,从而使得总磷浓度下降。河岸植被缓冲带增加了径流的阻力,减缓了径流的速度,使大多数固体颗粒沉淀,有利于可溶解的 N、P 随水渗透到更深层的土壤中,降低了地表径流对可溶性 N、P 的运转能力,有利于植物对营养物质的吸收以及土壤的吸附和微生物的作用。然而,由于河岸带区域复杂的水文和地形条件可能将累积的颗粒 P 转化为可移动的溶解 P,进而增加 P 流失的风险。

#### 3.2 河岸带植被对土壤氮磷元素迁移和转化过程的影响

河岸带植被类型与组成、土壤性质等都可以影响到土壤氮磷富集、迁移、转化过程。阿巴拉契亚山脉南部河岸带森林的砍伐显著提高了土壤和河流中的硝酸盐浓度,危害了河流的健康<sup>[79]</sup>。有研究表明流域的河岸植被恢复可减少悬浮泥沙(9.26%)、总氮(22.6%)和总磷(7.83%),保护和恢复河岸关键带的植被对于改善河流水质至关重要<sup>[77]</sup>。土壤中的反硝化微生物数量、种类、活性酶,土壤的通气状况、硝态氮浓度及其有机质和有效碳等都对反硝化作用产生重要影响。Merrill 在美国 Tahoe 湖流域的研究则认为河岸带的植被类型的异质性对土壤反硝化作用、净矿化速率、净硝化速率和地下水的营养动态都有显著的影响<sup>[80]</sup>。河岸植物多样性(物种的数量或丰富度)可以影响河岸带氮磷的地球物理循环过程和土壤侵蚀速率<sup>[81-83]</sup>。茂密的植被和广泛的地下根系可以有效的减少径流速度、捕获沉积物、增加渗透以及增加植物对养分的吸收<sup>[84]</sup>。地下根系的组成、深度和密度也影响着河岸生态系统的微生物过程(例如反硝化作用),地表水的过滤净化和河岸的稳定。河岸带植被的结构属性特别是宽度、密度和连续性对于截留、过滤沉积物和养分具有特别重要的意义,更宽、更密集和更连续的河岸植被的截留转化效率也越高<sup>[5]</sup>,有研究表明宽度为 50 m 的森林河岸带地上植被每年吸收的 N 和 P 分别为 77 kg/hm<sup>2</sup>与 10 kg/hm<sup>2</sup><sup>[85]</sup>。

河岸带植被的组成和结构决定其提供遮阴、截留沉积物和养分<sup>[5]</sup>。有的研究表明森林和草地河岸缓冲带截留转化浅地下水中硝态氮的效率都达到了 90% 以上,但森林河岸缓冲带截留转化硝态氮比草地河岸缓冲带更有效。Heathwaite 的研究表明,草地河岸缓冲带对 TN 和 TP 的平均去除率分别为 70%—95% 和 70%—98%。Kavian 等的研究发现,香根草种植后在防止土壤侵蚀和硝酸盐运输方面是最有效的<sup>[86]</sup>,有的研究表明现灌丛和林龄较小的河岸带植被对氮、磷等营养物质截留转化的能力较林龄大的更强,原因可能在于其对营养物的强烈吸收和土壤微生物的活动较高。也有研究表明乔木植被缓冲带对氮元素的吸收效果优于草本植被,但草本植被对磷元素的拦截效果显著。在东战备河自然河道的研究表明,灌草植被河岸带对面源污染物的去除率在全年内均较高,草本植被对污染物去除率在夏秋季最高而冬季最低,乔灌草植被的去除率高于

乔草<sup>[87]</sup>。

### 3.3 河岸带水文过程对氮磷迁移转化的影响

河流水位的变化可以显著影响河岸带近岸区域土壤磷的空间分布和迁移转化过程<sup>[88-89]</sup>。李兴福对呼伦贝尔草原辉河湿地的研究发现,随着淹水状态的改变,土壤的 C/N、C/P、N/P 均差异显著,并推测淹水状态的改变可能会导致土壤的理化性质以及生物特征发生改变,进而对土壤元素循环产生影响<sup>[90]</sup>。Mayer 对北卡罗来纳州的山麓河岸土壤磷素的研究中发现,水位的变化会影响河岸带植被对氮磷元素的转化截留<sup>[76]</sup>。Yeon 在室内模拟研究表明,地下水位或湿地水位的波动,会导致湿地沉积物中氮动态和氧化还原条件变化<sup>[91]</sup>。在法国西部一个农业流域的研究表明,旱季后地下水位上升期间的土壤再湿和长期水饱和和环境土壤铁(hydr)氧化物的还原溶解是季节性溶解磷释放的两个主要驱动因素。土壤氮、磷的迁移转化过程与效率在空间和时间上也表现出较大的差异<sup>[71]</sup>。河岸带土壤干旱的频率、淹水和持续时间变化会影响植物、微生物对氮磷截留与吸收<sup>[75]</sup>。刘艳丽通过试验发现对土壤干湿交替落处理中,土壤氮的矿化率降低了 34%—78%<sup>[92]</sup>。Dong 等利用同位素示踪技术发现干湿交替比持续淹水更利于土壤氮素的矿化,并增强了硝化作用<sup>[93]</sup>。地下水位升高时,河岸带植被的根系和土壤可以与径流充分接触,提高植被缓冲带对径流中营养物质的拦截,地下水位高及土壤富含有机质的河岸植被带对氮的减少量最大。

河岸植物群落可能会受到洪水泛滥期间沉积物增加的影响,这往往导致河岸系统大量输入氮和磷<sup>[94-96]</sup>。在美国维吉尼亚州的城市河流的研究发现,洪泛区水文连通性梯度的增加,增加了土壤养分的矿化速率<sup>[95]</sup>。对密西西比河上游的研究表明由于凋落物中的碳、氮和磷的浸出,水分饱和土壤和缺氧条件下降解有机化合物的积累会导致氮磷等养分的增加<sup>[97]</sup>。在西北北欧 5 个溪流的研究发现水位梯度的提升,可提取的土壤中的氮磷相应增加<sup>[98]</sup>。

## 4 展望

河岸带植被与土壤是生态系统重要组成部分,对于维持河岸带的生态健康、生态系统服务与可持续性具有至关重要的作用。水文是影响河岸带结构与功能的最重要的生态因子,探讨水文变化对河岸带湿地植被与土壤的影响尤为重要。对今后河岸带生态系统的研究仍需要关注以下几点:

(1) 目前水文变化对河岸带湿地植物的研究,多以植物的地上部分如植物形态、生理生态、群落分布与演替等为主,而对根系的形态、结构、功能特征的研究相对薄弱,根系作为土壤与植物地上部分之间物质循环与能量流动的关键纽带,需要加强此方面的研究。此外,水文变化对不同湿地植物的生理生态与功能特征的影响机理尚不清晰,需要继续研究不同类型湿地植物对水文变化的适应机制,以及植物不同组织与器官对环境因子的耐受阈值。

(2) 河岸带对土壤氮磷养分迁移的截留转化是一系列非常复杂的生物地球化学过程,其迁移转化过程主要受水文变化、土壤性状、植被群落结构特征和地形地貌等综合因素的影响,缺乏对多因素的耦合效应研究<sup>[5,24,78,99-100]</sup>。亟需继续加强水文变化对土壤氮磷迁移转化过程的机理研究,明晰河岸带独特水文环境特征下土壤吸附、植物吸收和反硝化对氮素截留转化过程的影响强弱与调控方法;深入研究与模拟磷的形态和数量在河岸带植物、土壤与水体不同介质中的迁移循环规律。

(3) 河流形态和土壤的多样性决定着河岸带水文作用特征的复杂性,今后需注重河岸带个性特征与水文响应的关系研究。河岸带生态系统是横向的水陆生态过渡带,同时也是河流上下游重要的纵向生态廊道,亟需从景观生态学与流域生态学的角度综合考虑和模拟流域土壤、植被与水文、人类活动之间的耦合关系,模拟预测未来气候与社会经济情境下的河岸带生态系统演变规律,提高河岸带生态系统自我修复能力,增强生态系统韧性,为河岸带生态系统的物质流与能量流调节、生物多样性保护、生态系统的完整性和连续性以及区域生态安全等提供理论依据与技术支持。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 郭二辉, 云菲, 冯志培, 常海荣, 杨喜田. 河岸带不同植被格局对表层土壤养分分布和迁移特征的影响. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1164-1172.
- [ 2 ] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [ 3 ] Janse J H, van Dam A A, Hes E M A, de Klein J J M, Finlayson C M, Janssen A B G, van Wijk D, Mooij W M, Verhoeven J T A. Towards a global model for wetlands ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 36: 11-19.
- [ 4 ] Maltby E, Acreman M C. Ecosystem services of wetlands: pathfinder for a new paradigm. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(8): 1341-1359.
- [ 5 ] Capon S J, Pettit N E. Turquoise is the new green: restoring and enhancing riparian function in the Anthropocene. *Ecological Management & Restoration*, 2018, 19(S1): 44-53.
- [ 6 ] 王兴菊, 许士国, 张奇. 湿地水文研究进展综述. *水文*, 2006, 26(4): 1-5, 9-9.
- [ 7 ] 王丽, 胡金明, 宋长春, 杨涛. 水位梯度对三江平原典型湿地植物根茎萌发及生长的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2432-2437.
- [ 8 ] 李英华, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响. *自然资源学报*, 2004, 19(1): 62-68.
- [ 9 ] Keddy P. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [ 10 ] Brotherton S J, Joyce C B, Berg M J, Awcock G J. Immediate and lag effects of hydrological change on floodplain grassland plants. *Plant Ecology*, 2019, 220(3): 345-359.
- [ 11 ] 李雅, 于秀波, 刘宇, 张广帅, 张全军, 段后浪. 湿地植物功能性状对水文过程的响应研究进展. *生态学杂志*, 2018, 37(3): 952-959.
- [ 12 ] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 陈伏生, 李述. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 597-605.
- [ 13 ] 王梦军. 黄土丘陵区不同植物群落生物多样性及土壤水文特征[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [ 14 ] Lugo A E, Brown S, Brinson M. *Ecosystems of the World, Vol. 15. Forested Wetlands*. New York: Elsevier, 1990.
- [ 15 ] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用. *应用生态学报*, 1996, 7(4): 439-448.
- [ 16 ] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶. 河岸植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1830-1837.
- [ 17 ] 孟宪民. 湿地与全球环境变化. *地理科学*, 1999, 19(5): 385-391.
- [ 18 ] 拱秀丽, 王毅勇, 聂晓, 尹晓梅. 沼泽湿地与周边旱田气温、相对湿度差异分析. *东北林业大学学报*, 2011, 39(11): 93-96, 101-101.
- [ 19 ] 崔丽娟, 康晓明, 赵欣胜, 李伟, 马牧源, 张曼胤, 魏圆云. 北京典型城市湿地小气候效应时空变化特征. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 212-218.
- [ 20 ] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征. *环境科学*, 2013, 34(4): 1324-1332.
- [ 21 ] 修晨, 欧阳志云, 郑华. 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析. *生态学报*, 2014, 34(6): 1535-1547.
- [ 22 ] Márquez C O, García V J, Schultz R C, Isenhardt T M. Assessment of soil aggradation through soil aggregation and particulate organic matter by riparian switchgrass buffers. *Agronomy*, 2017, 7(4): 76.
- [ 23 ] Baatrup-pedersen A, Garssen A, Göthe E, Hoffmann C C, Oddershede A, Riis T, van Bodegom P M, Larsen S E, Soons M. Structural and functional responses of plant communities to climate change-mediated alterations in the hydrology of riparian areas in temperate Europe. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(8): 4120-4135.
- [ 24 ] Allen D C, Wynn - Thompson T M, Kopp D A, Cardinale B J. Riparian plant biodiversity reduces stream channel migration rates in three rivers in Michigan, U.S.A. *Ecohydrology*, 2018, 11(4): e1972.
- [ 25 ] Gill K M, Goater L A, Braatne J H, Braatne J H, Rood S B. The irrigation effect: how river regulation can promote some riparian vegetation. *Environmental Management*, 2018, 61(4): 650-660.
- [ 26 ] Yang S T, Bai J, Zhao C S, Lou H Z, Zhang C B, Guan Y B, Zhang Y C, Wang Z W, Yu X Y. The assessment of the changes of biomass and riparian buffer width in the terminal reservoir under the impact of the South-to-North Water Diversion Project in China. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 932-943.
- [ 27 ] Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 2013, 339(6122): 940-943.
- [ 28 ] Xu X L, Zhang Q, Tan Z Q, Li Y L, Wang X L. Effects of water-table depth and soil moisture on plant biomass, diversity, and distribution at a seasonally flooded wetland of Poyang Lake, China. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(6): 739-756.
- [ 29 ] Dwire K A, Kauffman J B, Brookshire E N J, Baham J E. Plant biomass and species composition along an environmental gradient in montane riparian meadows. *Oecologia*, 2004, 139(2): 309-317.

- [30] Pennings S C, Grant M B, Bertness M D. Plant zonation in low-latitude salt marshes: disentangling the roles of flooding, salinity and competition. *Journal of Ecology*, 2005, 93(1): 159-167.
- [31] Rozner I, Titus J E. Zonation of emergent freshwater macrophytes: responses to small-scale variation in water depth. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2017, 144(3): 254-266.
- [32] 崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 唐娜, 谭学界. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应. *生态学报*, 2006, 26(5): 1533-1541.
- [33] Weiher E, Keddy P A. The assembly of experimental wetland plant communities. *Oikos*, 1995, 73(3): 323-335.
- [34] 葛振鸣, 王天厚, 施文彧, 赵平. 崇明东滩围垦堤内植被快速次生演替特征. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1677-1681.
- [35] 张琳, 杨劫, 呼格吉勒图, 宋炳煜, 丁越岩. 水位梯度对毛乌素沙地柳湾林群落特征影响. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1296-1300.
- [36] 朱丽, 徐贵青, 李彦, 唐立松, 牛子儒. 物种多样性及生物量与地下水位的关系——以海流兔河流域为例. *生态学报*, 2017, 37(6): 1912-1921.
- [37] Kennedy M P, Milne J M, Murphy K J. Experimental growth responses to groundwater level variation and competition in five British wetland plant species. *Wetlands Ecology and Management*, 2003, 11(6): 383-396.
- [38] 刘玉, 王国祥, 潘国权. 地下水位对芦苇叶片生理特征的影响. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(4): 53-5, 62-62.
- [39] 王海珍, 韩路, 徐雅丽, 牛建龙, 于军. 土壤水分梯度对灰胡杨光合作用与抗逆性的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 432-442.
- [40] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell & Environment*, 2010, 25(2): 275-294.
- [41] 谢涛, 杨志峰. 水分胁迫对黄河三角洲河口湿地芦苇光合参数的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 562-568.
- [42] Mauchamp A, Méthy M. Submergence-induced damage of photosynthetic apparatus in *Phragmites australis*. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 51(3): 227-235.
- [43] Waldhoff D, Furch B, Junk W J. Fluorescence parameters, chlorophyll concentration, and anatomical features as indicators for flood adaptation of an abundant tree species in Central Amazonia: *Symmeria paniculata*. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 48(3): 225-235.
- [44] 仲启铖, 关阅章, 刘倩, 曹流芳, 陆颖, 王璐, 王开运. 水位调控对崇明东滩围垦区滩涂湿地土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2141-2150.
- [45] Voesenek L A C J, Rijnders J H G M, Peeters A J M, van de Steeg H M, de Kroon H. Plant hormones regulate fast shoot elongation under water: from genes to communities. *Ecology*, 2004, 85(1): 16-27.
- [46] Maltchik L, Rolon A S, Schott P. Effects of hydrological variation on the aquatic plant community in a floodplain palustrine wetland of southern Brazil. *Limnology*, 2007, 8(1): 23-28.
- [47] 杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. *湿地科学*, 2014, 12(6): 807-813.
- [48] 李文, 王鑫, 潘艺雯, 刘以珍, 何亮, 张欢, 应智霞, 刘颖, 葛刚. 不同水淹深度对鄱阳湖洲滩湿地植物生长及营养繁殖的影响. *生态学报*, 2018, 38(9): 3014-3021.
- [49] 李强, 丁武泉, 王书敏, 朱启红, 杨俊, 柯胜钱, 秦露, 杨林静, 郑捷月, 孟蕊雯. 三峡库区多年高水位运行对消落带狗牙根生长恢复的影响. *生态学报*, 2020, 40(3): 985-992.
- [50] Parolin P. Submergence tolerance vs. escape from submergence: two strategies of seedling establishment in Amazonian floodplains. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 48(2): 177-186.
- [51] 符辉, 袁桂香, 曹特, 倪乐意, 张霄林. 水深梯度对苦草 (*Vallisneria spiralis*) 克隆生长与觅食行为的影响. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 705-711.
- [52] Chen X S, Xie Y H, Deng Z M, Li F, Hou Z Y. A change from phalanx to guerrilla growth form is an effective strategy to acclimate to sedimentation in a wetland sedge species *Carex brevicuspis* (Cyperaceae). *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2011, 206(4): 347-350.
- [53] 管博, 栗云召, 夏江宝, 董洪芳, 吕振波, 于君宝. 黄河三角洲不同水位梯度下芦苇植被生态特征及其与环境因子相关关系. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2633-2639.
- [54] Tóth V R, Szabó K. Morphometric structural analysis of *Phragmites australis* stands in Lake Balaton. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2012, 48(2): 241-251.
- [55] 柏祥, 陈开宁, 黄蔚, 古小治, 陈效民. 黄菖蒲和美人蕉对水深梯度的响应差异. *生态学杂志*, 2011, 30(3): 464-470.
- [56] 李亚芳, 陈心胜, 项文化, 谢永宏. 不同高程短尖苔草对水位变化的生长及繁殖响应. *生态学报*, 2016, 36(7): 1959-1966.
- [57] 袁连奇, 张利权. 调控淹水对互花米草生理影响的研究. *海洋与湖沼*, 2010, 41(2): 175-179.
- [58] 曲文静, 乔娅楠, 王灵艳, 唐占辉. 燕子花形态、生理和繁殖对水位变化的响应. *湿地科学*, 2018, 16(1): 79-84.
- [59] Chen H J, Zamorano M F, Ivanoff D. Effect of flooding depth on growth, biomass, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence of *Typha domingensis*. *Wetlands*, 2010, 30(5): 957-965.

- [60] 谢宝华, 王安东, 赵亚杰, 朱书玉, 宋建彬, 韩广轩, 管博, 张丽文. 刈割加淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响. 生态学杂志, 2018, 37(2): 417-423.
- [61] Khanday S A, Yousuf A R, Reshi Z A, Rashid I, Jehangir A, Romshoo S A. Management of *Nymphoides peltatum* using water level fluctuations in freshwater lakes of Kashmir Himalaya. *Limnology*, 2017, 18(2): 219-231.
- [62] Shi F X, Song C C, Zhang X H, Mao R, Guo Y D, Gao F Y. Plant zonation patterns reflected by the differences in plant growth, biomass partitioning and root traits along a water level gradient among four common vascular plants in freshwater marshes of the Sanjiang Plain, Northeast China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 158-164.
- [63] Striker G G, Colmer T D. Flooding tolerance of forage legumes. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(8): 1851-1872.
- [64] 陈芳清, 李永, 鄧光武, 许文年. 水蓼对水淹胁迫的耐受能力和形态学响应. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 142-146.
- [65] 徐金英, 陈海梅, 王晓龙. 水深对湿地植物生长和繁殖影响研究进展. 湿地科学, 2016, 14(5): 725-732.
- [66] Chen Z L, Yuan X Z, Roß-Nickoll M, Hollert H, Schäffer A. Moderate inundation stimulates plant community assembly in the drawdown zone of China's Three Gorges Reservoir. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32: 79.
- [67] Shan L P, Song C C, Zhang X H, Cagle G A, Shi F X. Plant defence allocation patterns following an increasing water level gradient in a freshwater wetland. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105542.
- [68] Bejarano M D, Sameel J, Su X L, Sordo-Ward A. Shifts in riparian plant life forms following flow regulation. *Forests*, 2020, 11(5): 518.
- [69] Shen R C, Lan Z C, Huang X Y, Chen Y S, Hu Q W, Fang C M, Jin B S, Chen J K. Soil and plant characteristics during two hydrologically contrasting years at the lakeshore wetland of Poyang Lake, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(9): 3368-3379.
- [70] Wu Z S, Liu J T, Huang J C, Cai Y J, Chen Y W, Li K Y. Do the key factors determining phytoplankton growth change with water level in China's largest freshwater lake? *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105675.
- [71] Gu S, Gruau G, Dupas R, Rumpel C, Crème A, Fovet O, Gascuel-Oudou C, Jeanneau L, Humbert G, Petitjean P. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 421-431.
- [72] Ledesma J L J, Futter M N, Blackburn M, Lidman F, Grabs T, Sponseller R A, Laudon H, Bishop K H, Köhler S J. Towards an improved conceptualization of riparian zones in boreal forest headwaters. *Ecosystems*, 2018, 21(2): 297-315.
- [73] Seena S, Carvalho F, Cássio F, Pascoal C. Does the developmental stage and composition of riparian forest stand affect ecosystem functioning in streams? *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1500-1511.
- [74] Bertolet B L, Corman J R, Casson N J, Sebestyen S D, Kolka R K, Stanley E H. Influence of soil temperature and moisture on the dissolved carbon, nitrogen, and phosphorus in organic matter entering lake ecosystems. *Biogeochemistry*, 2018, 139(3): 293-305.
- [75] Baldwin D S, Mitchell A M. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: a synthesis. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, 16(5): 457-467.
- [76] Mayer P M, Reynolds S K, McCutchen M D, Canfield T J. Riparian Buffer Width, Vegetative Cover, and Nitrogen Removal Effectiveness: A Review of Current Science and Regulations. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2005: 1131-1139.
- [77] de Mello K, Randhir T O, Valente R A, Vettorazzi C A. Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 514-524.
- [78] de Sosa L L, Glanville H C, Marshall M R, Williams A P, Jones D L. Quantifying the contribution of riparian soils to the provision of ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 807-819.
- [79] Cabezas A, Comín F A. Carbon and nitrogen accretion in the topsoil of the Middle Ebro River Floodplains (NE Spain): implications for their ecological restoration. *Ecological Engineering*, 2010, 36(5): 640-652.
- [80] Merrill A G, Benning T L. Ecosystem type differences in nitrogen process rates and controls in the riparian zone of a montane landscape. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 145-161.
- [81] Feld C K, Fernandes M R, Ferreira M T, Hering D, Ormerod S J, Venohr M, Gutiérrez-Cánovas C. Evaluating riparian solutions to multiple stressor problems in river ecosystems—A conceptual study. *Water Research*, 2018, 139: 381-394.
- [82] Ataollah K, Iman S, Mahmoud H, Brevik E C, Zeinab J, Jesús R. Effectiveness of vegetative buffer strips at reducing runoff, soil erosion, and nitrate transport during degraded hillslope restoration in northern Iran. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(9): 3194-3203.
- [83] Hale R, Reich P, Daniel T, Lake P S, Cavagnaro T R. Assessing changes in structural vegetation and soil properties following riparian restoration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 22-29.
- [84] Kieta K A, Owens P N, Lobb D A, Vanrobaeys J A, Flaten D N. Phosphorus dynamics in vegetated buffer strips in cold climates: a review. *Environmental Reviews*, 2018, 26(3): 255-272.
- [85] 张灿强, 张彪, 李文华, 杨艳刚, 王斌. 森林生态系统对非点源污染的控制机理与效果及其影响因素. 资源科学, 2011, 33(2): 236-241.

- [86] Kaviani A, Saleh I, Habibnejad M, Brevik E C, Jafarian Z, Rodrigo - Comino J. Effectiveness of vegetative buffer strips at reducing runoff, soil erosion, and nitrate transport during degraded hillslope restoration in northern Iran. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9): 3194-3203.
- [87] 李萍萍, 崔波, 付为国, 朱咏莉, 管永祥. 河岸带不同植被类型及宽度对污染物去除效果的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(6): 47-52.
- [88] 钱进, 沈蒙蒙, 王沛芳, 王超, 侯俊, 李昆, 刘晶晶. 河岸带土壤磷素空间分布及其对水文过程响应. *水科学进展*, 2017, 28(1): 41-48.
- [89] Qian J, Liu J J, Wang P F, Wang C, Hu J, Li K, Lu B H, Tian X, Guan W Y. Effects of riparian land use changes on soil aggregates and organic carbon. *Ecological Engineering*, 2018, 112: 82-88.
- [90] 李兴福, 苏德荣, 吕世海, 布和, 沃强, 韩立亮, 罗琰. 呼伦贝尔草原辉河湿地不同淹水状态的土壤碳氮磷特征比较. *生态学报*, 2018, 38(6): 2204-2212.
- [91] Han J Y, Kim D H, Oh S, Moon H S. Effects of water level and vegetation on nitrate dynamics at varying sediment depths in laboratory-scale wetland mesocosms. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134741.
- [92] 刘艳丽, 张斌, 胡锋, 乔洁, 张卫健. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响. *土壤*, 2008, 40(4): 554-560.
- [93] Dong N M, Brandt K K, Sørensen J, Hung N N, Van Hach C, Tan P S, Dalsgaard T. Effects of alternating wetting and drying versus continuous flooding on fertilizer nitrogen fate in rice fields in the Mekong Delta, Vietnam. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 166-174.
- [94] Craft C B, Casey W P. Sediment and nutrient accumulation in floodplain and depression freshwater wetlands of Georgia, USA. *Wetlands*, 2000, 20(2): 323-332.
- [95] Noe G B, Hupp C R, Rybicki N B. Hydrogeomorphology influences soil nitrogen and phosphorus mineralization in floodplain wetlands. *Ecosystems*, 2013, 16(1): 75-94.
- [96] Kronvang B, Hoffmann C C, Drøge R. Sediment deposition and net phosphorus retention in a hydraulically restored lowland river floodplain in Denmark; combining field and laboratory experiments. *Marine & Freshwater Research*, 2009, 60(7): 638-646.
- [97] Swanson W, De Jager N R, Strauss E, Thomsen M. Effects of flood inundation and invasion by *Phalaris arundinacea* on nitrogen cycling in an Upper Mississippi River floodplain forest. *Ecohydrology*, 2017, 10(7): e1877.
- [98] Garssen A G, Baatrup-Pedersen A, Riis T, Raven B M, Hoffman C C, Verhoeven J T A, Soons M B. Effects of increased flooding on riparian vegetation: field experiments simulating climate change along five European lowland streams. *Global Change Biology*, 2017, 23(8): 3052-3063.
- [99] Västilä K, Järvelä eJ. Characterizing natural riparian vegetation for modeling of flow and suspended sediment transport. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(10): 3114-3130.
- [100] Busato L, Boaga J, Perri M T, Majone B, Bellin A. Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: the Vermigliana Creek case study. *Science of the Total Environment*, 2018, 648: 1105-1120.