文章编号:1674-7070(2009)03-0238-05

湖滨湿地氮磷的转化及其归趋研究进展

郑建伟[1,2]　关保华[1]

摘要

概述了氮(N)、磷(P)两种元素在湖滨湿地迁移的研究. 随着富营养化问题日趋严重,湖泊水体可能逐渐由N、P的汇转变成向周围湿地输出的源,湖滨植被及土壤微生物可能起着关键作用. 开展N、P元素在富营养化湖泊水体与湖滨湿地间的迁移及其在湖滨湿地的归趋研究,有助于阐明湖滨湿地对富营养化湖泊的生态效应,为湖滨带湿地优化管理提供参考数据.

关键词

湖泊;湖滨湿地;氮(N);磷(P);转化

中图分类号 Q89;X524

文献标志码 A

0　引言

Introduction

湖泊是物质循环和生物栖息的一种开放系统,陆地上的可溶解氮(DN)、可溶解磷(DP)等营养元素都通过水流携带最终汇入湖泊系统,进行地球化学循环. 随着经济快速发展,进入湖泊系统的N、P等营养元素与日俱增,致使陆地湖泊日益呈现富营养化趋势,特别是那些流域范围内人类工农业活动较为活跃的湖泊,表现尤为显著. 水体富营养化导致寡营养型水域原有的生物多样性降低、生态系统结构趋于简化,使湖泊生态系统的健康面临愈来愈大的威胁,极端情况下会出现大规模水华暴发导致水域生态系统衰退[1].

N、P等营养元素主要通过大气沉降、地表径流及地下水携带输入湖泊系统. 除了部分非活性成分以沉积物形式暂时储存于湖底外,其输出方式通常为出湖水流携带,以气体形式向大气排放[2],通过地下水文向陆地转移,在湖泊系统生物体内累积,通过生物量收获形式移除.

为了减轻湖泊生态系统健康面临的日趋严重的富营养化威胁,弄清N、P营养元素在湖泊生态系统的累积和转化规律,国内外学者从多个方面进行了广泛研究,内容涉及水生生态系统的完整性及生态健康,水生植物体内N、P含量与水体营养的关系,水生生物群落结构对营养元素转化的影响,水生动植物对营养元素的富集转化能力[3],微生物对营养元素在水体及土壤—水界面转化的影响机制[4-5],营养元素在水体及底质中的形态变化[6-7],采用工程手段对河滨及湖滨植被修复及重建[8-9],底泥疏浚等诸多方面.

1　湖泊湿地磷的生物地球化学循环研究进展

Advances in the study on the biogeochemical circulation of phosphorus in lake and wetland

数十年来,国内众多学者围绕太湖水体富营养化元素P开展了大量研究,包括湖泊生物、水动力状况对湖泊中P的地球化学行为的影响[10];P元素在太湖水体及底泥沉积物中的赋存形态及释放、时空分布特征[4,11];底泥沉积物内P元素各种赋存形态的生物活性差异、相互转化的影响因素[10,12-13];底泥沉积物与上覆水之间营养物质的交换特征[14];微生物活动对沉积物内P活性的影响[15];太湖湖底水土界面N、P交换通量的时空差异[16];湖泊水域中P形态转化及其潜在生态效应[17];土壤中N和速效P的空间梯度变化,太湖滨岸带芦苇区沉积物中P的特征[18]等.

影响沉积物中P再释放的因素很多,包括生物的(如细菌活性、有机质矿化过程、生物扰动等)、化学的(如Eh、pH值、铁磷含量比、硝

收稿日期 2009-06-22

资助项目 中国科学院南京地理与湖泊研究所重点实验室开放基金(2008SKLLSE009)

作者简介

郑建伟,男,博士,讲师,主要从事保护生物学和遥感应用研究. zhengjw1975@163.com

1　中国科学院 南京地理与湖泊研究所,南京,210008

2　南京信息工程大学 环境科学与工程学院,南京,210044

酸根的供给程度)以及物理的(如沉积物的再悬浮)各种因素[10]. 太湖这样的浅水性湖泊属于湿地范畴,相应的稻田及其它自然和人工湿地类型方面的研究结果基本上也适用于太湖水域.

水文是湿地环境中的重要因子,对湿地生态系统的结构与功能具有重要影响. 湿地对 P 的截留主要通过土壤吸附和沉淀、植物吸收、微生物固定、泥炭增长等作用来实现[19]. 干湿交替变化可以增加土壤对 P 的滞留作用[20]. 土壤对 P 的截留主要受土壤理化性质影响,包括土壤孔隙度、pH 值、粒度、有机质含量、铁铝氧化物、Ca^{2+}、$CaCO_3$ 等. 水位的变化影响湿地土壤中 N、P 等营养物质的转化和释放[21]. 微生物对 P 的去除是湿地除 P 的机制之一,主要通过对 P 的生物有效性改变、正常同化吸收和过量积累,有机 P 化合物的分解矿化等途径实现[22]. 在酸性和中性 pH 值条件下,土壤中的亚硝化细菌和硝化细菌活动增强,其中硝化作用占主导地位;而在碱性 pH 值条件下,可溶性正磷酸盐的化学沉淀作用占主导作用. 土壤对 P 的储存能力与有机质含量有关,一般有机质含量愈高,对 P 的吸附能力愈强[23].

植被是湿地系统重要的组成部分,对营养物质的截留起着十分重要的作用. 一方面,植物可以通过根系直接吸收同化水中的无机 P,并通过植物的收割而去除;另一方面,它的根区为微生物生存和降解营养物质提供了必要的场所和好氧厌氧条件[24]. 有关研究表明,自然及人工湿地植被带能大幅度降低进入河湖水系的 P 营养物质[25].

2 湖泊湿地氮生物地化循环研究进展

Advances in the study on the biogeochemical circulation of nitrogen in lake and wetland

湖泊和湿地 N 元素的生物地化过程大致可划分为 3 个过程,即:N 素的输入过程(包括生物固 N、大气沉降、人为 N 输入和径流输入等);N 素的转化过程(包括 N 素的矿化作用、硝化作用、NH_4^+ 的同化作用、植物吸收和 N 素在食物网中的转化等);N 素的归趋过程(包括土壤固定、反硝化作用导致的气态损失、NH_3 挥发、径流输出、侵蚀和植物收获等)[26].

湿地 N 素可以通过生物转化、植物吸收、微生物暂时固 N 等方式去除,但永久性除 N 是通过反硝化过程完成的[27-28]. 在 N 素的生物地球化学循环过程中,生物转化比非生物转化更重要[29],包括植物、微生物及其分泌到土壤中的酶类[30]. 微生物是 N 循环的驱动泵,在没有人为活动干扰的湖泊中,微生物在 N 素的输入和向大气释放过程中起着非常重要的作用[31]. 低氧浓度下,部分硝化细菌和反硝化细菌通过在沉积物厌氧层内的作用,以 N_2O、N_2 等气体形态去除的内源 N 负荷,可达到湖泊外源性 N 输入总量的一半以上[28].

湖滨湿地对 N 素的净化作用主要是通过植物体的移除和通过 NH_3、N_2、N_2O 气态形式向大气释放实现的. 在 N 元素的生物地球化学过程中,湿地植被起着非常重要的作用. 在淹水条件下,反硝化作用是主要过程,并且 N_2 的释放量超过 N_2O 从而成为反硝化作用的主要产物,总的气态 N 损失量最高(77% ~ 95%),而转化为有机 N 化合物的比例很低(1.8%). 淹水土壤条件下,在长有植被 Phragmites australis 的湿地中,N_2O 的释放量是未生长该植被的两倍多,且形成的 N_2O 和 N_2 有 15% 经由 Phragmites 从土壤转运到大气中[32].

Matheson 等[33]研究发现,提高植被覆盖度能够促进反硝化作用导致 N 的损失增加,有利于河岸湿地水质功能的提高. 微生物在湿地系统营养物 N 的去除中起着主要作用[34],LIN 等[2]通过湿地植物收割实验发现,只有 4% ~11% 的 N 是通过植物吸收去除的,而绝大部分 N(89% ~96%)是由反硝化作用去除的. 植物收获作为一种永久性的 N 去除方式,其重要性不大[34].

植物在 N 元素的生物地球化学循环中所起的作用主要是通过不同途径影响 N 化合物的微生物转化来实现的:1)植物根系呼吸作用导致的根区氧气消耗,会形成根区强烈的氧梯度[35],从而在局部形成厌氧微环境,促进反硝化的进行;2)根系分泌物为微生物生长提供碳源[36];3)湿地植物能够在大气和土壤间进行气体(O_2、气态 N)交换,调节 N 元素的循环过程[37];4)植物对水分的吸收可改变土壤通风状态,从而影响气体和溶解态营养物质的扩散和生物有效性.

由于植物存在而形成的根区微生态环境对湿地土壤中发生的硝化和反硝化作用是非常重要的物理、化学和生物过程的活性区域[38]. 河滨植被通过影响土壤温度、湿度和矿化 N 库而影响土壤 N 矿化和有效性[39]. 营养丰富的湿地土壤较贫瘠的湿地土壤有更强的反硝化作用,土壤有机质含量是反硝化作用强弱的制约因子[40]. 潜流湿地具有较强的反硝化潜力,反硝化作用强度明显高于硝化作用强度[41].

湿地水文和水分状况对 N 素的空间分布及去除能力有着重要影响. 湿地水位显著影响着 N 分布的水平分异和垂直分异. 土壤中 NO_3^- 的迁移受土壤质地、土壤中动水和不同水分含量等因素的影响. CHEN 等[42]认为,湿地水位上升时,NO_3^- 向河滨湿地的输入量受河滨植物和土壤的影响.

很多学者采用 ^{15}N 示踪法研究 N 素在不同条件下

的生物地化循环特征[43]. 土壤水分含量是通过影响氧含量而间接影响反硝化的强度以及 N_2O/N_2 的产生比率,当湿地水分增加后反硝化增强,不利于有效 N 的保持. 三江平原典型小叶章湿地土壤 N 素中的 NH_4^+—N、NO_3^-—N 含量均表现为典型草甸小叶章湿地大于沼泽化草甸小叶章湿地,其主要原因为生物固持作用以及土壤水分增加引起反硝化作用增强所致[44].

反硝化过程及 N_2O 释放的影响因素包括降水、土壤水分、温度、pH 值、Eh、土壤质地、土壤基质等. 周期性淹水可以使得湿地中氧化区和还原区交替出现,满足了 N 循环的需要并使反硝化速率最大化[45]. 而当稻田经历干湿交替循环,有较高的 N_2O 排放通量,水分落干期间 N_2O 排放量占水稻生长期排放总量的 87.5% 以上[46].

3 N、P 在湖滨湿地的转化及归趋研究展望
A prospect of the study on diversion and morphological change of nitrogen and phosphorus between lake and aquatic-terrestrial everglade

国内外学者对 N、P 营养元素在湿地和湖泊生物地球化学循环方面开展了广泛、卓有成效的研究,取得了大量成果. 这些成果深化了人们对湖泊富营养化的认识和理解,为改善和治理湖泊富营养化的决策提供了大量基础数据. 但迄今为止,人们对富营养元素 N、P 在湿地和湖泊中的生物地球化学循环过程的认识仍不够充分,还不能提出一个完善的解决湖泊富营养化问题的方案. 此问题的解决有待科研工作者继续开展更为广泛而深入的研究,进一步加深对该问题的认识和理解.

太湖是我国一个典型的浅水性湖泊,近年来其水体富营养化程度日益严重. 其成因是多方面的,如环湖工农业污染物质的排放量增加,出湖水系改变导致的湖水滞留期增长,湖滨湿地减少,环湖大堤对水文水陆交换界面的阻断,不合理的捕捞及渔业养殖等[47]. 太湖富营养化问题的研究多集中于 N、P 营养元素在湖泊水体内及与底泥沉积物之间的循环转化特征,或构造湿地对 N、P 营养元素的滞留与去除效应[48],而对于湖滨带与水体之间 N、P 生物地化过程的研究较少[18]. 一个可行的方向是从目前开展湿地系统内部过程的孤立研究转向湿地与周边环境的相互作用[49],对湿地生态系统与毗邻生态系统之间因 N、P 营养元素交换所产生的生态环境效应进行综合研究[26].

湖泊与周围湖滨带湿地的联系是通过湖泊潮汐和地下水文进行的,这个过程伴随着 N、P 等营养物质的交流. 长期或季节性积水的湿地通常与浅层地下水的关系十分密切,两者间水文联系是湿地物质迁移转化的重要驱动力. 远离湖岸地下水的水化学特征主要受区域地下水控制,湖滨地带水化学特征主要受湖泊控制[50].

由于湖滨带湿地特殊的地理微环境,其范围内的生物有着旺盛的生命活力. 相对于周围陆地生态系统和湖泊水体,湖滨湿地对 N、P 元素具有高效的固定和净化能力[39,51]. 湖泊水体在寡营养情况下,湖滨湿地对入湖地表水携带的 N、P 营养物质具有显著的滞留和净化能力[48];随着湖泊水体日益富营养化,湖泊将由寡营养条件下接纳 N、P 营养物质的汇逐渐转变成向外输出的源. 而湖滨湿地固定和去除的 N、P 营养物质可能主要来自湖泊水体,从而起到对富营养化湖泊水体的净化作用.

在湿地 N、P 元素的生物地球化学循环过程中,植被起着非常重要的作用. 湖泊水体内的 N、P 元素通过潮汐沉积在湖滨湿地表层,湖滨湿地植物可从表层沉积物中吸收 N、P 元素,向上转移到植物地上部分,向下转移到更深的土层中,并随根系的横向扩展对 N、P 元素水平迁移. 湖滨湿地植被为土壤微生物创造了一个良好的生存环境,经微生物的作用对 N、P 进行固定和去除.

研究 N、P 营养元素在太湖水体与湖滨湿地间的交换特征及在湖滨湿地内的迁移规律,并就 N、P 元素的植被吸收、湿地对 P 元素的矿化固定,以及 N 元素经硝化和反硝化作用的归趋开展系统研究,可为湖滨湿地的优化管理以及决策提供参考数据.

参考文献
References

[1] Brilerley G, Fryirs K, Outhet D. Application of the river styles framework as a basis for river management in New South Wales, Australia[J]. Applied Geography, 2002, 22: 91-122

[2] Lin Y F, Jing S R, Wang T W. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. Environmental Pollution, 2002, 119: 413-420

[3] 吴爱平,吴世凯,倪乐意. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水中营养的关系[J]. 水生生物学报, 2005, 29(4): 406-412
WU Aiping, WU Shikai, NI Leyi. Study of macrophytes nitrogen and phosphorus contents of the shallow lakes in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29(4): 406-412

[4] 秦伯强,朱广伟,张路,等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学 D, 2005, 35: 33-34
QIN Boqiang, ZHU Guangwei, ZHANG Lu, et al. Model and estimate method of inner nutrient release from sediments in large shallow lake—Case: Lake Taihu[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35: 33-34

[5] 张政,付融冰. 河道坡岸生态修复的土壤生物工程应用[J].

湖泊科学,2007,19(5):558-565
ZHANG Zheng,FU Rongbing. Ecological restoration of riverbanks using soil bioengineering[J]. Journal of Lake Sciences,2007,19(5):558-565

[6] 邢光熹,曹亚澄,施书莲,等. 太湖地区水体氮的污染源和反硝化[J]. 中国科学 B,2001,31(2):130-137
XING Guangxi,CAO Yacheng,SHI Shulian,et al. Sources of nitrogen pollution and denitrification in water bodies of the Taihu region[J]. Science in China Series B:Chemistry Sciences,2001,31(2):130-137

[7] 李敏,韦鹤平,王光谦,等. 长江口、杭州湾水域沉积物中磷的化学形态分布特征[J]. 海洋学报,2004,26(2):125-131
LI Min,WEI Heping,WANG Guangqian,et al. Study on the distribution and different forms of phosphorus in sediments from the Yangtze River Estuary and the Hangzhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica,2004,26(2):125-131

[8] 李明辉,彭少麟,申卫军,等. 景观生态学与退化生态系统恢复[J]. 生态学报,2003,23(8):1622-1628.
LI Minghui,PENG Shaolin,SHEN Weijun,et al. Landscape ecology and restoration of degraded ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(8):1622-1628

[9] 陈小华,李小平. 河道生态护坡关键技术及其生态功能[J]. 生态学报,2007,27(3):1168-1176
CHEN Xiaohua,LI Xiaoping. The eco-functions of ecological protection techniques of riverbank[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(3):1168-1176

[10] 朱广伟,高光,秦伯强,等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展,2003,14(6):714-719
ZHU Guangwei,GAO Guang,QIN Boqiang,et al. Geochemical characteristics of phosphorus in sediments of a large shallow lake [J]. Advances in Water Science,2003,14(6):714-719

[11] 张路,范成新,王建军,等. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J]. 湖泊科学,2008,20(3):263-270
ZHANG Lu,FAN Chengxin,WANG Jianjun,et al. Nitrogen and phosphorus forms and release risks of lake sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences,2008,20(3):263-270

[12] 张路,范成新,朱广伟,等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征[J]. 湖泊科学,2006,18(1):36-42
ZHANG Lu,FAN Chengxin,ZHU Guangwei,et al. Distribution of biologically available Phosphorus(BAP) in lake sediments of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences,2006,18(1):36-42

[13] Mhazndi M A,Aleya L,Devaux J. Phosphorus exchanges between sediment and water in trophically different reservoirs[J]. Water Research,1994,28(9):1971-1980

[14] 范成新,杨龙元,张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. 湖泊科学,2000,12(4):259-366
FAN Chengxin,YANG Longyuan,ZHANG Lu. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in the Taihu Lake and their interrelations[J]. Journal of Lake Sciences,2000,12(4):259-366

[15] 冯胜,秦伯强,高光. 太湖磷转化细菌与水体磷形态关系[J]. 湖泊科学,2008,20(4):428-436
FENG Sheng,QIN Boqiang,GAO Guang. The relationships between phosphorus-transmuting bacteria and phosphorus forms in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences,2008,20(4):428-436

[16] 张路,范成新,王建军,等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J]. 环境科学,2006,27(8):1537-1543
ZHANG Lu,FAN Chengxin,WANG Jianjun,et al. Space-time dependent variances of ammonia and phosphorus flux on sediment-water interface in Lake Taihu[J]. Environmental Science,2006,27(8):1537-1543

[17] 黄清辉,王磊,王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态[J]. 湖泊科学,2006,18(3):199-206
HUANG Qinghui,WANG Lei,WANG Zijian. Advance in the study on phosphorus speciation,transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes[J]. Journal of Lake Sciences,2006,18(3):199-206

[18] 徐德兰,雷泽湘,王洪君,等. 太湖滨岸带芦苇区沉积物磷的特征[J]. 湿地科学,2007,5(2):133-139
XU Delan,LEI Zexiang,WANG Hongjun,et al. Characteristics of phosphorus of sediments with reed community in the littoral zone of Lake Taihu[J]. Wetland Science,2007,5(2):133-139

[19] Pant H K,Reddy K R,Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of subsurface flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering,2001,17(4):345-355

[20] Venterink H O. Impact of drying and rewetting on N,P and K dynamics in a wetland soil[J]. Plant and Soil,2002,243:119-130.

[21] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. 水土保持学报,2004,18(4):193-196
WANG Guoping. Character of phosphorus biogeochemistry on wetlands[J]. Journal of Soil Water Conservation,2004,18(4):193-196

[22] 张鸿,陈光荣,吴振斌. 两种人工湿地中氮磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,1999,33(4):575-578
ZHANG Hong,CHEN Guangrong,WU Zhenbin. The study on the relationship between N/P removing rates and the distribution of bacteria in two artificial wetlands[J]. Journal of Central China Normal University:natrural sciences,1999,33(4):575-578

[23] 潘继花,何岩,邓伟,等. 湿地对水中磷素净化作用的研究进展[J]. 生态环境,2004,13(1):102-104,108
PAN Jihua,HE Yan,DENG Wei,et al. Progress in the study on the function of wetland to remove phosphorus in water[J]. Ecology and Environmental Sciences,2004,13(1):102-104,108

[24] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学,1995,16(3):83-86
WU Xiaolei. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Enviromental Science,1995,16(3):83-86

[25] Inamori R,Wang Y H,Yamomoto T,et al. Seasonal effect on N_2O formation in nitrification in constructed wetlands[J]. Chemosphere,2008,73:1071-1077

[26] 孙志高,刘景双,于君宝,等. N 示踪技术在湿地氮素生物地球化学过程研究中的应用进展[J]. 地理科学,2005,25(6):762-768
SUN Zhigao,LIU Jingshuang,YU Junbao,et al. Application advance of N trace technique in the biogeochemical process of nitrogen in wetland[J]. Scientia Geographica Sinica,2005,25(6):762-768

[27] 赵同谦,徐华山,任玉芬,等. 滨河湿地对农业非点源氮污染控制研究进展[J]. 环境工程学报,2008,8(11):1441-1446
ZHAO Tongqian,XU Huashan,REN Yufen,et al. Research progress in agricultural non-point nitrogen pollution control in riparian wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2008,8(11):1441-1446

[28] Hefting M M,Clement J C,Bienkowski P. The role of vegetation and litter in the nitrogen dynamics of riparian buffer zones in Europe[J]. Ecological Engineering,2005,24:465-482

[29] 曾巾,杨柳燕,肖琳,等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用[J]. 湖泊科学,2007,19(4):382-389
ZENG Jin,YANG Liuyan,XIAO Lin,et al. Biogeochemical cycling of nitrogen in lakes and the role of microorganisms in conversion of nitrogen compounds[J]. Journal of Lake Sciences,2007,19(4):382-389

[30] Casciotti K L,Ward B B. Dissimilatory nitrite reductase genes from

autotrophic ammonia-oxidizing bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(5): 2213-2221

[31] 李思亮,刘丛强,肖化云. 地表环境氮循环过程中微生物作用及同位素分馏研究综述[J]. 地质地球化学,2002,30(4):40-45
LI Siliang, LIU Congqiang, XIAO Huayun. Microbial effect on nitrogen cycle and nitrogen isotope fractionation on the earth's surface-a review[J]. Geology Geochemistry, 2002, 30(4): 40-45

[32] Uurike R, Jurgen A, Rolf R. Nitrate removal from drained and reflooded fen soils affected by soil transformation processes and plant uptake[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36: 77-90

[33] Matheson F E, Nguyen L, Coorper A B. Fate of nitrate in unplanted, planted and harvested riparian wetland soil microcosms[J]. Ecological Engineering, 2002, 19: 249-264

[34] Casey R E, Taylor M D, Klaine S J. Mechanisms of nutrient attenuation in a subsurface flow riparian wetland[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30: 1732-1737

[35] Brune A, Frenzel P, Cypionka H. Life at the oxic-anoxic interface: microbial activities and adaptations[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2000, 24: 691-710

[36] Karjalainen H, Steeansdottir G, Tuominen L. Do submersed plants enhance microbial activity in sediment[J]. Aquatic Botany, 2001, 69: 1-13

[37] Engelaar W M H G, Symens J C, Laanbroeck H J. Preservation of nitrifying capacity and nitrate availability in waterlogged soils by radial oxygen loss from roots of wetland plants[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 20: 243-248

[38] Kemp W M, Sampou P, Cairey J. Ammonium recycling versus denitrification in Chesapeake Bay sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1990, 35: 1545-1563

[39] 刘景双. 湿地生物地球化学研究[J]. 湿地科学,2005,3(4):302-309
LIU Jingshuang. Wetland biogeochemistry research[J]. Wetland Science, 2005, 3(4): 302-309

[40] Groffman P M, Hanson G C. Wetland denitrification: Influence of site quality and relationships with wetland delineation protocols[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 323-329

[41] 黄娟,王世和,鄢璐,等. 潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究[J]. 环境科学,2007,28(9):1965-1969
HUANG Juan, WANG Shihe, YAN Lu, et al. Intensity of nitrification and denitrification in subsurface-flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2007, 28(9): 1965-1969

[42] Chen R, Twilley R R. Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark river estuary, Florida[J]. Estuaries, 1999, 22(4): 955-970

[43] Anne K S, Pal T M. Use of stable nitrogen isotope fractionation to estimate denitrification in small constructed wetlands treating agricultural runoff[J]. Science of the Total Environment, 2008, 392: 157-165

[44] 孙志高,刘景双. 三江平原典型小叶章湿地土壤氮素净矿化与硝化作用[J]. 应用生态学报,2007,18(8):1771-1777
SUN Zhigao, LIU Jingshuang. Soil nitrogen net mineralization and nitrification in typical Calamagrostis angustifolia wetlands in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1771-1777

[45] 白军红,王庆改,余国营. 吉林省向海沼泽湿地土壤中特征及生产效应研究[J]. 土壤通报,2002,33(2):113-116
BAI Junhong, WANG Qinggai, YU Guoying. Study on the distribution characteristics and productive effects of nitrogen in soil of Xianghai mire wetland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(2): 113-116

[46] Xu H, Xing G, Zu C C. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49: 23-28

[47] 陈杨辉,吴义锋,吕锡武. 生态混凝土在河道护坡中的应用[J]. 中国水土保持,2007,6:42-43
CHEN Yanghui, WU Yifeng, Lü Xiwu. The application of ecological Concrete in the river slope protection[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007, 6: 42-43

[48] Jan V. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380: 48-65

[49] 熊汉锋,王运华. 湿地碳氮磷的生物地球化学循环研究进展[J]. 土壤通报,2005,36(2):240-243
XIONG Hanfeng, WANG Yunhua. Advances in researches on biogeochemical circulation of C, N and P in wetlands[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 240-243

[50] 王磊,章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水文化学联系研究[J]. 湿地科学,2007,5(2):166-173
WAGN Lei, ZHANG Guangxin. Hydrochemical interaction between surface water and groundwater in the Zhalong Wetland[J]. Wetland Science, 2007, 5(2): 166-173

[51] 王洪君,王为东,卢金伟,等. 湖滨带温室气体氧化亚氮(N_2O)排放研究[J]. 生态环境,2006,15(2):270-275
WANG Hongjun, WANG Weidong, LU Jinwei, et al. N_2O emissions from the littoral zone[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(2): 270-275

Review of diversion and morphological change of nitrogen and phosphorus between lake and aquatic-terrestrial everglade

ZHENG Jianwei[1,2] GUAN Baohua[2]

1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Lake eutrophication is one hot spot of biogeochemistry. Nitrogen and phosphorus' diversion between lake and aquatic-terrestrial everglade is summarized in this paper. With its eutrophication becoming more and more serious, a lake could gradually turn from the sink of nitrogen and phosphorus into one source of both, with the vegetation and microorganisms in the soil playing a critical role in the processes. Carrying out a study on diversion and morphological change of nitrogen and phosphorus from lake water to aquatic-terrestrial everglade will help to illuminate the ecological effect of aquatic-terrestrial everglade on lake eutrophication, and hence provide some reference data for the optimal management of everglade in the littoral zone.

Key words lake; aquatic-terrestrial everglade; nitrogen; phosphorus; diversion