

刘存歧,李昂,李博,等. 2012. 白洋淀湿地芦苇生物量及氮、磷储量动态特征[J]. 环境科学学报,32(6):1503-1511

Liu C Q, Li A, Li B, et al. 2012. Dynamics of biomass, nitrogen and phosphorus storage of *Phragmites australis* in Baiyangdian Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(6):1503-1511

白洋淀湿地芦苇生物量及氮、磷储量动态特征

刘存歧^{1,*}, 李昂¹, 李博², 王军霞¹, 张亚娟¹, 刘莎¹

1. 河北大学生命科学学院, 保定 071002

2. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

收稿日期: 2011-08-19 修回日期: 2011-09-19 录用日期: 2011-09-28

摘要: 作为由水陆相互作用形成的独特生境, 湿地生态系统在氮、磷等营养元素的生物地球化学循环中发挥着重要的作用. 本文在实地调查和实验室测定的基础上, 研究了白洋淀湿地芦苇 (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel) 各构件的生物量和氮、磷含量, 在此基础上估算了氮、磷储量并系统分析了各指标在生长季节的动态变化. 结果表明, 各构件生物量随时间的推移而逐渐增加, 叶片生物量的最大值出现在 6 月, 根状茎生物量的最大值则出现在 8 月, 叶鞘、地上茎和地上部分生物量的最大值出现在 10 月; 地上各部分氮、磷含量的最大值均出现在 4 月的生长初期, 其后随时间的推移而逐渐降低, 最小值出现的时间各不相同, 根状茎氮、磷含量的最大值分别出现在 8 月和 4 月; 各部分氮、磷储量与生物量间存在显著的相关性, 地上部分氮、磷储量的最大值均出现在 6 月, 分别为 $(18.91 \pm 2.12) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(1.17 \pm 0.13) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

关键词: 白洋淀; 芦苇; 生物量; 氮、磷含量; 氮、磷储量

文章编号: 0253-2468(2012)06-1503-09

中图分类号: X171

文献标识码: A

Dynamics of biomass, nitrogen and phosphorus storage of *Phragmites australis* in Baiyangdian Lake

LIU Cunqi^{1,*}, LI Ang¹, LI Bo², WANG Junxia¹, ZHANG Yajuan¹, LIU Sha¹

1. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002

2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 19 August 2011;

received in revised form 19 September 2011;

accepted 28 September 2011

Abstract: As the special habitat formed by the interaction between terra and water area, wetlands play important roles in biogeochemical cycling process of nitrogen and phosphorus. To understand the growth dynamics and characteristics of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel in Baiyangdian Lake, a typical wetland ecosystem, field investigation and laboratory measurements were conducted to identify its biomass, nitrogen and phosphorus content and storage. Results showed that with the growth of *P. australis*, biomass of leaf and root increased firstly and reached the maximum value in June and August respectively, then decreased. In comparison, biomass of stem, sheath and shoot increased during the whole growth season, and reached the maximum value in October. It also showed that nitrogen and phosphorus content of each aboveground component was the highest at April, during the early period of growth. Nitrogen and phosphorus content of root reached the maximum value in August and April respectively, and the time that nitrogen and phosphorus content of each component reached the minimum value was different. There were significant relationships between nitrogen and phosphorus storage, and biomass with the maximum nitrogen and phosphorus storage of shoot were $(18.91 \pm 2.12) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and $(1.17 \pm 0.13) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, occurring both in June.

Keywords: Baiyangdian Lake; *Phragmites australis*; biomass; nitrogen and phosphorus content; nitrogen and phosphorus storage

1 引言 (Introduction)

湿地是由水陆相互作用而形成的独特生境, 与森林、海洋同为世界三大生态系统之一, 占地球表面积的 6.4%, 为地球上超过 20% 的已知物种提供

了生境, 具有不可替代的生态功能 (杨永兴, 2002). 湿地生态系统普遍具有较高的初级生产力 (Falkowski *et al.*, 2000), 在氮、磷等营养元素的生物地球化学循环中发挥着重要的作用 (白军红等, 2002).

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2009ZX07209-008-05)

Supported by the Major Science and Technology Project on Water Pollution Control and Remediation, P. R. China (No. 2009ZX07209-008-05)

作者简介: 刘存歧 (1967—), 男, 教授 (博士), E-mail: liucunqi@sina.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: LIU Cunqi (1967—), male, professor (Ph. D.), E-mail: liucunqi@sina.com; * **Corresponding author**

湿地植被是湿地生态系统结构和功能的基础,对全球生态平衡具有非常显著的调控作用(Bayley *et al.*, 2004; 白军红等, 2010). 氮和磷是构建植物群落重要的营养盐,也是湿地生态系统重要的限制因子和水质富营养化的主要原因(王佳宁等, 2006). 湿地生态系统中氮、磷含量的改变会导致物种间竞争格局和适应环境胁迫能力的变化,从而引发植物群落的演替,最终导致湿地生态系统结构和功能的变化(Older *et al.*, 2002; Gusewell *et al.*, 2002). 富营养化是当前人类面临的重要环境问题之一,国内外已开展了大量相关研究(Kathleen, 1977; 黄清辉等, 2006; 胡绵好等, 2011). 过去的 20~30 年间,围绕富营养化水体的治理,各级政府投入了大量的人力、物力和财力,但由于水域生态系统自身和富营养化形成原因及影响因素的复杂性,仍有许多问题亟待解决(金相灿, 2008). 近年来,人们开始认识到水生植物在富营养化水体治理中的重要作用,一方面,水生高等植物可以通过吸收水体和沉积物中的营养盐,降低环境中的营养元素含量与内源负荷,遏制水华等现象的发生(吴春笃等, 2006);另一方面,可以为相关微生物提供适宜的生存转化污染物质,降低污染物浓度(Kaseva, 2004). 在人工湿地中,通过植物的直接吸收可以有效去除水体中的氮和磷,是一种行之有效的生物治污措施(陈进军等, 2008).

芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel)属禾本科多年生草本植物,耐盐碱、水湿,广泛分布于各种类型的生境中. 氮、磷是芦苇生长发育不可缺少的重要营养元素,研究芦苇群落氮、磷循环,可以增进对于湿地生态系统的结构与功能及其对气候变化的响应等方面的理解. 目前,关于湿地芦苇群落氮、磷循环的研究主要集中在芦苇对氮、磷的富集等方面(Jose *et al.*, 1999; 王为东等, 2001; 吴春笃等, 2006; 欧维新等, 2006),对其氮、磷含量与储量的研究较少(吴淑杭等, 2006; Tylova *et al.*, 2008; 曾从盛等, 2009; 吴统贵等, 2010);同时,由于自然条件的差异,不同区域芦苇生物量、氮、磷含量及储量具有较大差异(鲍志娟等, 2002; 闫芊等, 2007; 贾庆宇等, 2008; 冯大兰等, 2009),基础数据的不足制约着对芦苇湿地生态系统氮、磷循环及其功能变化的理解.

白洋淀湿地是华北地区最大的淡水湖泊,对于保证全流域和北京、天津等重要城市的环境安全具

有重要作用(王强等, 2008). 芦苇在白洋淀分布广泛,是白洋淀分布面积最大、最典型的水生植被,在湿地功能的发挥过程中起着不可替代的作用. 现有针对白洋淀湿地芦苇的研究尚不全面(徐卫华等, 2005; 杨卓等, 2008; 李博等, 2009; 王为东等, 2010). 因此,本文以白洋淀湿地芦苇群落为研究对象,揭示芦苇不同构件氮、磷分布特征及其氮、磷储量的动态变化,为探讨芦苇在湿地氮、磷循环过程中的作用提供参考.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区域概况

白洋淀湿地(38°43'~39°02'N, 115°38'~116°07'E)位于华北平原中部(图1),海拔5~10 m,地势较平坦,自西向东微倾,坡降在1/6000左右. 该区域由于河流泥沙冲淤和人为因素的共同影响,微地貌结构十分复杂,淀区被39个村、3700条沟壕分割成大小不等、形状各异的143个淀泊. 地貌景观以水体为主,上游由孝义河、潞龙河、唐河、府河、萍河、漕河、瀑河和白沟引河等河流注入,下游经东部赵北口东流与海河相通,适宜水位为7~9 m,年均地表径流量为 $4.52 \times 10^9 \text{ m}^3$. 该区属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,多年平均气温7.3~12.7℃,平均年积温2992~4409℃. 全流域多年平均降雨量为563.7 mm,年内分配不均,7—9月降水量占全年降水量的80%(赵翔等, 2005). 自20世纪60年代以来白洋淀上游修建水库150多座,总库容达 $3.64 \times 10^9 \text{ m}^3$;白洋淀周边建有防洪堤坝,最高水位12.8 m. 白洋淀水位在20世纪50年代最高,20世纪80年代和21世纪初的水位明显低于其它年份;各年内的水位变化趋势明显,最低值和最高值一般分别出现在6月和9月. 1920—2003年白洋淀共有7次干淀记录,其中,20世纪80年代干淀次数最多、历时最长,1984—1988年共有5年时间连续干淀. 近年来,由于淀内降水不多、上游来水很少,白洋淀淀区面积又逐渐萎缩,水环境问题日益突出(张婷等, 2010).

白洋淀湿地内以沼泽为主,土壤营养物质丰富,生物种类繁多,是芦苇的理想产地. 但自20世纪70年代以来,由于遇到干旱周期,加上上游工农业用水不断增加,导致湿地面积萎缩、苇地面积波动、芦苇品质变差,芦苇产量也由20世纪60年代的8万t下降到1996年的1.5万t,不仅影响当地农民

的收入,也影响到湿地生物多样性的保护和生态服

务功能的发挥(安新县地方志编撰委员会,2000)。

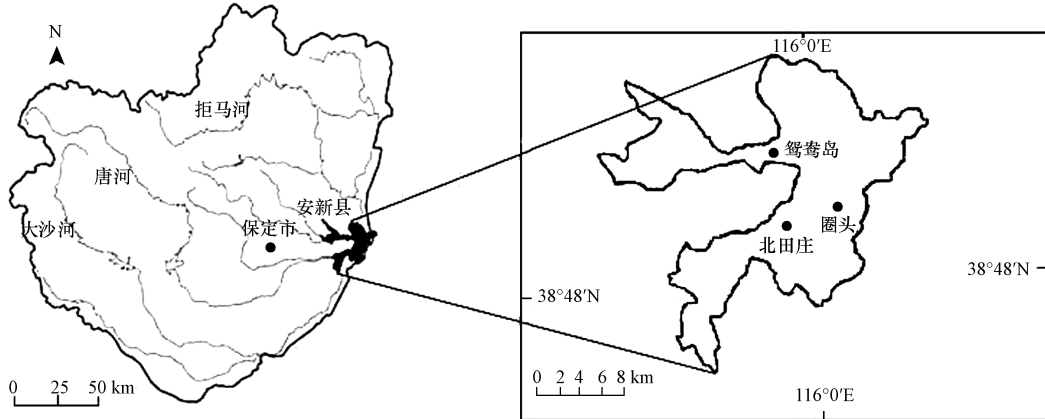


图1 白洋淀位置及采样点分布示意图

Fig. 1 Location of Baiyangdian Lake and distribution of sample sites

2.2 研究方法

分别于2009年4月22日、6月23日、8月31日和10月31日进行4次采样,样地选择在白洋淀湿地内鸳鸯岛、北田庄和圈头区域的典型苇地(图1),每块样地内随机选取3个样方(1 m × 1 m)。研究区域内芦苇的地上部分每年秋季经人工进行收割后移除,地下部分多年积累,不进行收获。

2.2.1 生物量的测定 地上部分生物量的测定:统计样方内芦苇密度、高度后,采用“W”方法随机选取样方内芦苇9株,齐地割取后测定鲜重,标记后带回实验室,将每株芦苇按照茎、叶片和叶鞘等构件分类,80℃恒温烘干至少48 h至恒重,以平均单株构件干重乘以密度得到样方内该构件的生物量,同一样方内各构件生物量的和为该样方内芦苇地上部分的生物量。

地下部分生物量的测定:齐地割取地上部分后,挖出样方内(0~60 cm)土样放入网筛,筛选得到地下部分,标记后带回实验室,冲洗后烘干至恒重,称重得地下部分生物量。采集到的地下部分主要为根状茎,故本文中地下部分与根状茎指代意义相同。

2.2.2 氮、磷含量的测定及储量计算 将烘干至恒重的样本粉碎过筛后,装袋保存于干燥处备用。分别采用凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定样本氮、磷含量(郝再彬等,2004)。氮、磷储量的计算公式分别为: $M_N = T_N \times B$, $M_P = T_P \times B$,其中, M_N 、 M_P 分别为氮、磷储量($g \cdot m^{-2}$),以每 m^2 内芦苇所积累的氮、磷含量表示; T_N 、 T_P 分别为单位生物量中的氮、磷含量($g \cdot kg^{-1}$); B 为单位面积内的生物量($kg \cdot m^{-2}$)。

2.3 数据处理

采用SPSS 18.0统计软件对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),采用Duncan多重比较(Duncan's multiple range test)检验各参数间的差异,采用Microsoft Office Excel 2007软件进行绘图。

3 结果(Results)

3.1 芦苇生物量动态特征

调查期内芦苇地上茎、叶片、叶鞘、根状茎(即地下部分,下同)和地上部分生物量的变化范围分别为56.23~2039.63、42.30~662.72、47.78~512.51、3220.00~6070.00和146.31~3151.12 $g \cdot m^{-2}$;单位面积内芦苇地上茎、叶片、叶鞘、根状茎和地上部分生物量在生长季节内的变化趋势基本相同(图2),各部分生物量随时间的推移而逐渐增加。不同构件的最大值出现时间不一,叶鞘、地上茎和地上部分生物量的最大值出现在10月;叶片生物

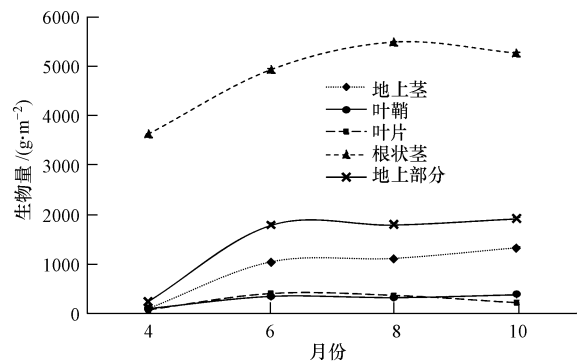


图2 芦苇各构件生物量的动态变化

Fig. 2 Dynamic in biomass of each component of *P. australis*

量的最大值出现在6月,其后随着生长季的结束与脱落,生物量率先降低;根状茎生物量的最大值则出现在8月。

3.2 芦苇氮、磷含量动态特征

由图3可见,调查期内芦苇地上茎、叶片、叶鞘和根状茎的氮含量范围分别为1.95~33.13、11.74

~45.97、7.07~26.37、4.84~12.52 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;磷含量范围分别为0.09~3.02、0.35~4.95、0.32~2.85、0.46~1.06 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。数据分析显示,地上茎、叶片、叶鞘的氮、磷含量间存在显著正相关关系($p < 0.01$),而根状茎的氮、磷含量间相关性不显著(图4)。

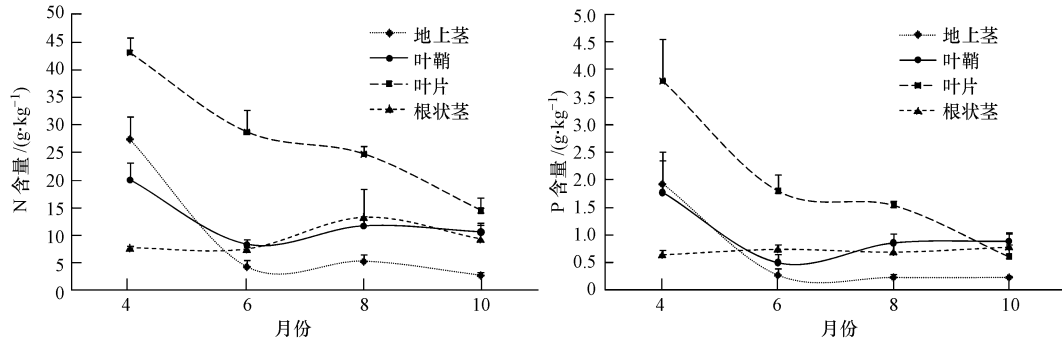


图3 芦苇各构件氮、磷含量动态变化

Fig. 3 Dynamic in N and P content of each component of *P. australis*

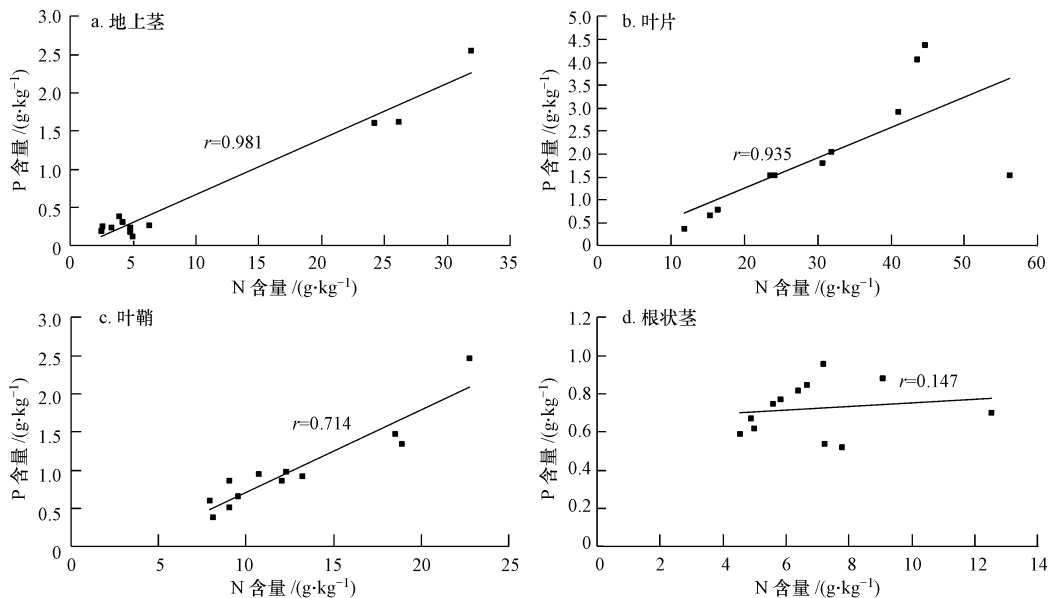


图4 芦苇各构件中氮、磷含量相关关系

Fig. 4 Relationship between N and P content in each component of *P. australis*

3.3 芦苇氮、磷储量动态特征

由表1可知,芦苇各部分氮储量的总体特征为地下部分大于地上部分,根状茎最大,叶片次之,地上茎、叶鞘最小。各部分氮储量的最小值均出现在4月,地上茎氮储量的最大值出现在8月,为 $(6.00 \pm 1.00) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$;叶片氮储量的最大值出现在6月,为 $(11.54 \pm 1.40) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,至10月显著下降;叶鞘氮储量的最大值出现在10月,为 $(3.92 \pm 0.22) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$;地上部分氮储量的最大值出现在6月,为 $(18.91 \pm$

$2.12) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$;根状茎氮储量的最大值出现在8月,为 $(48.31 \pm 3.93) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

芦苇各部分磷储量的总体特征与氮储量相同,除叶片外最小值均出现在4月(表2)。地上茎、叶鞘、根状茎磷储量的最大值均出现在10月,分别为 $(0.31 \pm 0.04) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $(0.33 \pm 0.03) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $(4.33 \pm 0.42) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$;叶片磷储量的最大值出现在6月,为 $(0.71 \pm 0.07) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,至10月份显著降低至最小值 $(0.13 \pm 0.03) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$;地上部分磷储量随

叶片在 6 月达到最大值(1.17 ± 0.13) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其后 出现回落.

表 1 芦苇各构件氮储量

Table 1 N storage of each component of *P. australis*

月份	N 储量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$				
	地上茎	叶片	叶鞘	地上部分	根状茎
4	$2.41 \pm 0.26^{\text{bc}}$	$2.68 \pm 0.23^{\text{c}}$	$1.77 \pm 0.20^{\text{c}}$	$6.86 \pm 0.67^{\text{b}}$	$18.20 \pm 0.75^{\text{d}}$
6	$4.45 \pm 0.53^{\text{ab}}$	$11.54 \pm 1.40^{\text{a}}$	$2.92 \pm 0.36^{\text{b}}$	$18.91 \pm 2.12^{\text{a}}$	$28.19 \pm 1.81^{\text{c}}$
8	$6.00 \pm 1.00^{\text{a}}$	$8.98 \pm 0.91^{\text{b}}$	$3.73 \pm 0.42^{\text{ab}}$	$18.71 \pm 2.19^{\text{a}}$	$48.31 \pm 3.93^{\text{a}}$
10	$3.69 \pm 0.52^{\text{b}}$	$3.06 \pm 0.51^{\text{c}}$	$3.92 \pm 0.22^{\text{a}}$	$10.67 \pm 1.19^{\text{b}}$	$38.63 \pm 3.00^{\text{b}}$

注: 同列不同小写字母代表差异性显著($p < 0.05$), 下同.

表 2 芦苇各构件磷储量

Table 2 P storage of each component of *P. australis*

月份	P 储量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$				
	地上茎	叶片	叶鞘	地上部分	根状茎
4	$0.17 \pm 0.03^{\text{b}}$	$0.24 \pm 0.03^{\text{c}}$	$0.17 \pm 0.03^{\text{b}}$	$0.59 \pm 0.09^{\text{b}}$	$2.35 \pm 0.13^{\text{b}}$
6	$0.29 \pm 0.05^{\text{ab}}$	$0.71 \pm 0.07^{\text{a}}$	$0.17 \pm 0.02^{\text{b}}$	$1.17 \pm 0.13^{\text{a}}$	$3.71 \pm 0.22^{\text{a}}$
8	$0.26 \pm 0.05^{\text{ab}}$	$0.55 \pm 0.04^{\text{b}}$	$0.29 \pm 0.04^{\text{a}}$	$1.10 \pm 0.11^{\text{a}}$	$3.85 \pm 0.30^{\text{a}}$
10	$0.31 \pm 0.04^{\text{a}}$	$0.13 \pm 0.03^{\text{c}}$	$0.33 \pm 0.03^{\text{a}}$	$0.77 \pm 0.08^{\text{b}}$	$4.33 \pm 0.42^{\text{a}}$

3.4 芦苇生物量与氮、磷储量的关系

相关性分析结果显示, 芦苇各部分生物量与氮、磷储量间呈显著正相关关系($p < 0.01$) (图 5);

各部分生物量与氮、磷储量在生长季节的变化趋势完全相同, 氮、磷含量与储量间的相关性不显著.

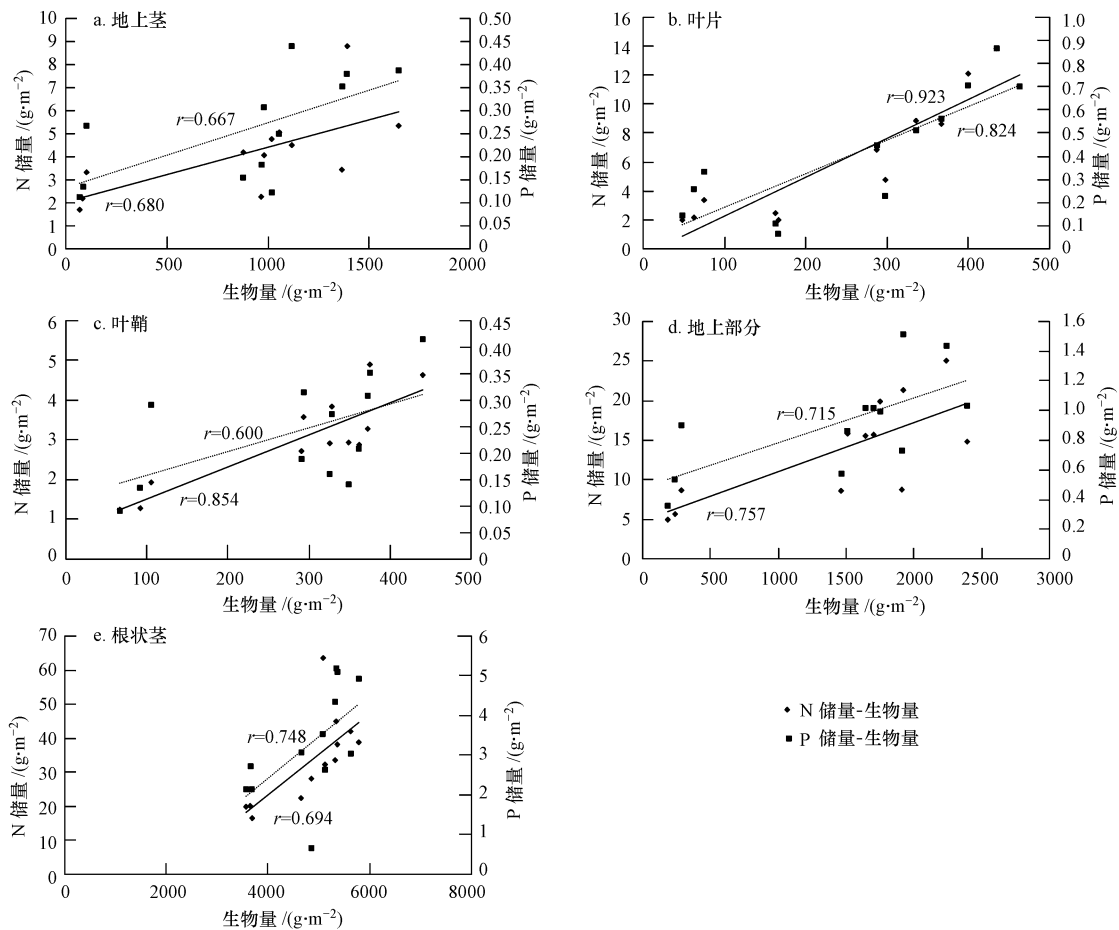


图 5 芦苇各构件生物量与氮、磷储量的相关关系

Fig. 5 Relationship between biomass, N and P storage in each component of *P. australis*

4 讨论 (Discussion)

植物生物量是一项重要的生物学定量指标,是研究生态系统物质循环、能量流动的物质基础.同时,也可应用于群落演替及退化生态系统恢复的研究.

芦苇根状茎是储存营养物质的主要场所,多年积累于地下而不进行收获,所以生物量大于地上的一年生的构件;地上茎主要行使支撑、运输等作用,是芦苇地上部分的主体,故生物量在地上部分各构件中最高;叶片是进行光合作用和蒸腾作用的主要场所,在植物的生长季中不可或缺,但在植物体生物量中所占比例较小,生长季过后先行凋落,导致该部分生物量减少;叶鞘连接地上茎和叶片,起保护作用,但白洋淀芦苇在后3次采样中均有虫害发生,主要位于叶鞘和地上茎的连接部位,会对叶鞘的生物量和其中氮、磷的分布产生影响,建议针对虫害适当施用农药或采取生物防治措施,保证芦苇的正常生长.

白洋淀湿地芦苇生物量与杭州湾滨海湿地(吴统贵等,2010)和崇明东滩湿地(闫芊等,2007)近似;白洋淀湿地芦苇地上部分生物量小于内蒙古乌梁素海芦苇的地上部分生物量,地下部分生物量大于乌梁素海(段晓男等,2004),从而具有较高的地下/地上生物量比值,显示出与乌梁素海芦苇所不同的分配策略,是植物体与环境相互作用而形成的适应机制;但与黄河三角洲国家级湿地自然保护区(冯忠江等,2008)相比,白洋淀湿地芦苇的地上部分、地下部分生物量与地下/地上生物量比值均较大,且波动范围较小,显示出白洋淀湿地为芦苇提供了相对稳定的生境;与吉林西部白城芦苇实验站(鲍志娟等,2002)和三江平原芦苇沼泽湿地(张友民等,2006)相比,白洋淀湿地具有较高的芦苇地上、地下部分生物量,从而具有较高的生态系统净初级生产力.

氮是植物生长发育的必需元素,生命活动的基础物质蛋白质与核酸的合成及功能的正常行使都需要大量的氮,氮还是叶绿素的重要组成部分(赵平等,1998).湿地土壤中的氮含量遵循植被的生长发育节律,随着物候期的变化而不断变化(何池全等,2000),芦苇氮含量分布的季节差异是氮素在植株内各个器官间分配和转运的综合结果.本研究中白洋淀湿地芦苇地上部分各构件氮含量随着物候

期而发生变化,最大值都出现在4月,此时为芦苇的生长初期,其后随着植物体的生长和生物量的增加,氮元素在植物体内的分布出现“稀释”效应,表现为氮含量随时间的推移而逐渐降低;根状茎作为芦苇的存储器官,氮含量随时间推移的变化较小,最高值则出现在8月,此时生长季已经基本结束,地上部分即将进入凋谢期.上述现象符合植物的生长特征与物候规律,与辽河三角洲盘锦湿地(贾庆宇等,2008)和闽江河口湿地(曾从盛等,2009)相比,白洋淀湿地芦苇植株各部分的氮含量偏低,但是高于北固山湿地(吴春笃等,2006).

芦苇叶片的氮储量在光合作用最强烈的6月出现最大值,其后随着光合作用减弱、植物生长季的结束及叶片的凋落而逐渐降低;地上茎与叶鞘的生长终止时间晚于叶片,故其氮储量的最大值出现在8月,亦晚于叶片,其后随着营养元素在体内的转移而降低;根状茎是芦苇植株最大、最稳定的氮储库,虽然其中的氮含量随时间变化不大,但由于生物量的不断积累导致氮储量在8月出现最大值,其后随着植物生长结束并开始凋落,到10月略有下降.地上茎直立于地面,如果不进行收获将在生长结束后留在原地;叶片凋落后直接参与植物体与土壤氮库的循环,因此,这两部分氮的去向对湿地氮库的氮平衡和年际间氮流动的研究十分重要.

芦苇植株的氮储量和地上部分、地下部分的氮储量均在8月出现最大值,也能从上述分析中得到解释.与辽河三角洲盘锦湿地、闽江河口湿地和北固山湿地相比,白洋淀湿地芦苇地上部分的氮储量偏低,但高于杭州湾滨海湿地,且各部分氮储量最大值出现的时间均较杭州湾滨海湿地提前.

磷在植物体内的含量仅次于碳、氮、钾,主要以磷酸、磷脂等有机物的形式存在,广泛地参与光合作用、呼吸作用、能量存储和传递等过程,并发挥着重要的作用(Carroll *et al.*, 2003).芦苇植株磷含量的变化趋势与氮含量相似,也是在4月出现最大值后由于生长引发的“稀释”效应而降低;叶片光合作用强度的变化直接影响磷含量(周晓红等,2008),所以在整个生长季中磷含量变化幅度最大;地上茎和根状茎的结构与功能稳定,磷含量亦相对稳定;叶鞘的磷含量变化趋势不同于其他部分,或与后3次采样均于此处发现虫害有关.总体而言,白洋淀湿地芦苇植株地上部分磷含量高于闽江河口湿地(曾从盛等,2009),与上海梦清园人工湿地(吴淑杭

等,2006)相当,低于澳门路氹湿地(林小涛等,2007)。

芦苇叶片的磷储量在光合作用最强烈的6月出现最大值,其后随着光合作用减弱、植物由生长期进入繁殖期以及叶片的凋落而逐渐减少;地上茎和叶鞘生理活动相对稳定,全年磷储量变化不大;根状茎主要行使存储功能,所以磷储量一直在增加。

植株和地下部分的磷储量在10月出现最大值,地上部分磷储量的最大值出现在6月,随后下降。白洋淀湿地芦苇地上部分磷储量高于闽江河口湿地和上海梦清园人工湿地,低于澳门路氹湿地。

不同区域芦苇氮、磷储量的差异较大,其原因在于土壤地球化学、植物生理学和植物群落组成等因素的综合作用,本研究区域芦苇的氮、磷储量明显小于北固山湿地,与闽江河口湿地和杭州湾滨海湿地相差不大。原因可能在于北固山湿地污染严重,水体和土壤氮、磷含量较高,而白洋淀湿地的氮、磷输入主要进入水体,水体与台地土壤中氮、磷的转移速率较低,造成了相对较低的土壤氮、磷含量。

白洋淀湿地芦苇植株地上部分的氮、磷储量最大值均出现在6月,在以净化水质、吸收营养元素为目的的人工湿地中,此时是收割植株地上部分以实现氮、磷净化效果的最佳时间。但白洋淀湿地作为海河流域最重要的湖泊湿地之一,具有调节区域气候、缓洪滞沥等重要的生态服务功能,芦苇作为该区域分布面积最大、最典型的水生植被,在上述功能的发挥过程中起着不可替代的作用;此外,芦苇还是该区域内重要的经济作物。因此,对于白洋淀湿地芦苇收割时间的选择不能只依据氮、磷储量,而要综合考虑各方面的因素,以做出最佳选择。

5 结论(Conclusions)

在生长季节内,白洋淀湿地芦苇植株叶片和根状茎生物量的最大值分别出现在6月和8月,叶鞘、地上茎和地上部分生物量的最大值出现在10月;地上部分各构件的氮、磷含量变化趋势相近,都是在4月出现最大值后逐渐降低,最小值出现的时间不一,与不同构件的生理特性有关,地下部分根状茎的氮、磷含量相对稳定;地下部分的氮、磷储量高于地上部分,各构件氮、磷储量的最小值均出现在4月,叶片的磷储量除外,其最小值出现在生长末期的10月;本研究区域内芦苇最佳收割时间的选择要

综合考虑生态、经济等多种因素,不能仅参考植株的氮、磷储量。

责任作者简介:刘存歧(1967—),男,博士,教授,主要从事水域生态学和湿地生态恢复等方面的研究,目前已在国内外学术刊物上发表论文50余篇。

参考文献(References):

- 安新县地方志编撰委员会. 2000. 安新县志[M]. 北京: 新华出版社. 10-17
- Local Editor Commission of Anxin. 2000. Anxin [M]. Beijing: Xinhua Publishing House. 10-17 (in Chinese)
- 白军红, 邓伟, 朱颜明. 2002. 湿地生物地球化学过程研究进展[J]. 生态学杂志, 21(1): 53-57
- Bai J H, Deng W, Zhu Y M. 2002. Advance in study on the biogeochemical process in wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 21(1): 53-57 (in Chinese)
- 白军红, 王庆改, 高海峰, 等. 2010. 向海沼泽湿地芦苇中氮含量动态变化和循环特征[J]. 湿地科学, 8(2): 164-168
- Bai J H, Wang Q G, Gao H F, et al. 2010. Dynamic changes of nitrogen contents and nitrogen cycling in *Phragmites australis* of Xianghai Marsh Wetland[J]. Wetland Science, 8(2): 164-168 (in Chinese)
- 鲍志娟, 盖平. 2002. 吉林省西部地区芦苇地上部生物量季节动态的研究[J]. 吉林农业大学学报, 24(5): 31-34
- Bao Z J, Gai P. 2002. A research on seasonal dynamics of aboveground biomass of *Phragmites australis* in western part of Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 24(5): 31-34 (in Chinese)
- Bayley S E, Mewhor R L. 2004. Plant community structure and functional differences between marshes and fens in southern boreal region of Alberta, Canada[J]. Wetlands, 24(2): 277-294
- Carroll P V, Claudia U, Deborah L A. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. New Phytologist, 157(3): 423-447
- 陈进军, 郑翀, 郑少奎. 2008. 表面流人工湿地中水生植被的净化效应与组合系统净化效果[J]. 环境科学学报, 28(10): 2029-2035
- Chen J J, Zheng C, Zheng S K. 2008. Pollutant purification of a surface flow constructed wetland planted with different aquatic macrophytes and their combination[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(10): 2029-2035 (in Chinese)
- 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 等. 2004. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及其影响因子分析[J]. 植物生态学报, 28(2): 246-251
- Duan X N, Wang X K, Ouyang Z Y, et al. 2004. The biomass of *Phragmites australis* and its influencing factor in Wuliangsu Hai[J]. Acta Phytocologica Sinica, 28(2): 246-251 (in Chinese)
- Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. Science, 290(5490): 291-296
- 冯大兰, 刘芸, 黄建国. 2009. 三峡库区消落带土壤不同含水量条件下芦苇的氮素与生物量动态变化[J]. 环境科学学报, 29(9): 2003-2009
- Feng D L, Liu Y, Huang J G. 2009. Changes of biomass and nitrogen

- content of reed (*Phragmites australis*) under different soil moisture conditions in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(9):2003-2009 (in Chinese)
- 冯忠江,赵欣胜. 2008. 黄河三角洲芦苇生物量空间变化环境解释[J]. *水土保持研究*, 15(3):170-174
- Feng Z J, Zhao X S. 2008. The environmental interpretation for the space change of the reed biomass in the Yellow River Delta [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 15(3):170-174 (in Chinese)
- Gusewell S, Koerselman W. 2002. Variation in nitrogen and phosphorus concentration of wetland plants [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 5(1):37-61
- 郝再彬, 苍晶, 徐仲, 等. 2004. 植物生理实验(第1版) [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社. 69-71
- Hao Z B, Cang J, Xu Z, et al. 2004. *Experimental Plant Physiology* (1st edition) [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press. 69-71 (in Chinese)
- 何池全, 赵魁义, 余国营, 等. 2000. 湿地生态过程研究进展 [J]. *地球科学进展*, 15(2):165-171
- He C Q, Zhao K Y, Yu G Y, et al. 2000. The advance of wetland ecological process [J]. *Advance of Geoscience*, 15(2):165-171 (in Chinese)
- 胡绵好, 袁菊红, 杨肖娥. 2011. 温度对植物浮床净化富营养化水体能力的影响 [J]. *环境科学学报*, 31(2):283-291
- Hu M H, Yuan J H, Yang X E. 2011. Effects of temperature on purification ability of a planted floating bed system treating eutrophic water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(2):283-291 (in Chinese)
- 黄清辉, 王磊, 王子健. 2006. 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*, 18(3):199-206
- Huang Q H, Wang L, Wang Z J. 2006. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 18(3):199-206 (in Chinese)
- 贾庆宇, 周广胜, 周莉, 等. 2008. 湿地芦苇植株氮素分布动态特征分析 [J]. *植物生态学报*, 32(4):858-864
- Jia Q Y, Zhou G S, Zhou L, et al. 2008. Dynamics of nitrogen content of *Phragmites australis* in Panjin wetland, China [J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32(4):858-864 (in Chinese)
- 金相旭. 2008. 湖泊富营养化研究中的主要科学问题——代“湖泊富营养化研究”专栏序言 [J]. *环境科学学报*, 28(1):21-23
- Jin X C. 2008. The key scientific problems in lake eutrophication studies [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(1):21-23 (in Chinese)
- Jose A R, Hans B, Francisco A C. 1999. Interactive effects of N and P on growth, nutrient allocation and NH_4 uptake kinetics by *Phragmites australis* [J]. *Aquatic Botany*, 64:369-380
- Kaseva M E. 2004. Performance of sub-surface flow constructed wetland in polishing pet-treated wastewater—a tropical case study [J]. *Water Research*, 38(3):681-687
- Kathleen I K. 1977. Allelopathic influence on blue-green bloom sequence in a eutrophic lake [J]. *Science*, 196(4292):885-887
- 李博, 刘存歧, 王军霞, 等. 2009. 白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究 [J]. *农业环境科学学报*, 28(12):2603-2607
- Li B, Liu C Q, Wang J X, et al. 2009. Carbon storage and fixation function by *Phragmites australis*, a typical vegetation in Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(12):2603-2607 (in Chinese)
- 林小涛, 梁海含, 梁华, 等. 2007. 澳门路氹湿地芦苇氮磷含量的季节变化 [J]. *生态学杂志*, 26(1):5-8
- Lin X T, Liang H H, Liang H, et al. 2007. Seasonal variation of nitrogen and phosphorus contents of *Phragmites australis* in Taipa-Coloane wetland in Macao [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 26(1):5-8 (in Chinese)
- Olde V H, Pieterse N M, Belgers J D M, et al. 2002. N, P and K budgets along nutrient availability-productivity gradients in wetlands [J]. *Ecological Applications*, 12(4):1010-1026
- 欧维新, 杨桂山, 高建华. 2006. 盐城潮滩湿地对 N、P 营养物质的截留效应研究 [J]. *湿地科学*, 4(3):179-186
- Ou W X, Yang G S, Gao J H. 2006. Retention effect of wetland for nitrogen and phosphorus nutrients in the coastal zone of the Yancheng [J]. *Wetland Science*, 4(3):179-186 (in Chinese)
- Tylova E, Steinbachova L S, Votrubova O, et al. 2008. Phenology and autumnal accumulation of N reserves in belowground organs of wetland helophytes *Phragmites australis* and *Glyceria maxima* affected by nutrient surplus [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1):28-38
- 王佳宇, 晏维金, 贾晓栋. 2006. 长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测 [J]. *环境科学学报*, 26(4):658-666
- Wang J N, Yan W J, Jia X D. 2006. Modeling the export of point sources of nutrient from Yangze River basin and discussing countermeasures [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(4):658-666 (in Chinese)
- 王强, 刘静玲, 杨志峰. 2008. 白洋淀湿地不同时空水生植物生态需水规律研究 [J]. *环境科学学报*, 28(7):1447-1454
- Wang Q, Liu J L, Yang Z F. 2008. Environmental water demand of Baiyangdian Lake at different times and places [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(7):1447-1454 (in Chinese)
- 王为东, 王大力, 尹澄清, 等. 2001. 芦苇型湿地生态系统的潜水水质状态研究 [J]. *生态学报*, 21(6):919-925
- Wang W D, Wang D L, Yin C Q, et al. 2001. A study on the groundwater quality of the Baiyangdian wetland ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(6):919-925 (in Chinese)
- 王为东, 王亮, 聂大刚, 等. 2010. 白洋淀芦苇型水陆交错带水化学动态及其净化功能研究 [J]. *生态环境学报*, 19(3):537-543
- Wang W D, Wang L, Nie D G, et al. 2010. Studies on hydrochemical changes and purification effects of the *Phragmites australis* - dominated land/inland water ecotones in Baiyangdian Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 19(3):537-543 (in Chinese)
- 吴春笃, 沈明霞, 储金宇, 等. 2006. 北固山湿地藨草氮磷积累和转移能力的研究 [J]. *环境科学学报*, 26(4):674-678
- Wu C D, Shen M X, Chu J Y, et al. 2006. On the capacity of accumulation and transfer of nitrogen and phosphorus in *Phalaris arundinacea* Linn. in Mount Beigu Wetland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(4):674-678 (in Chinese)
- 吴淑杭, 徐亚同, 姜震方, 等. 2006. 梦清园人工湿地芦苇的氮磷和生物量动态及其适宜收割期的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 25

- (6): 1594-1597
- Wu S H, Xu Y T, Jiang Z F, *et al.* 2006. Seasonal dynamics of nitrogen, phosphorus and biomass of *Phragmites australis* at Mengqingyuan Garden artificial wetland in Shanghai [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 25(6): 1594-1597 (in Chinese)
- 吴统贵, 吴明, 虞木奎, 等. 2010. 杭州湾滨海湿地芦苇生物量及 N、P 储量动态变化[J]. *中国环境科学*, 30(10): 1408-1412
- Wu T G, Wu M, Yu M K, *et al.* 2010. Dynamics of biomass and N, P storage of *Phragmites australis* in Hangzhou Bay Wetlands [J]. *China Environmental Science*, 30(10): 1408-1412 (in Chinese)
- 徐卫华, 欧阳志云, Iris V D, 等. 2005. 白洋淀地区近 16 年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J]. *水土保持学报*, 19(4): 181-189
- Xu W H, Ouyang Z Y, Iris V D, *et al.* 2005. Reed land change and its relationship to water level in Baiyangdian Lake since 1987 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19(4): 181-189 (in Chinese)
- 杨永兴. 2002. 国际湿地科学研究的主要特点、进展和展望[J]. *地理科学进展*, 21(2): 111-120
- Yang Y X. 2002. Main characteristics progress and prospect of international wetland science research [J]. *Progress in Geography*, 21(2): 111-120 (in Chinese)
- 闫芊, 陆健健, 何文姗. 2007. 崇明东滩湿地高等植被演替特征[J]. *应用生态学报*, 18(5): 1097-1101
- Yan Q, Lu J J, He W S. 2007. Succession character of salt marsh vegetation in Chongming Dongtan wetland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(5): 1097-1101 (in Chinese)
- 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 2005. 白洋淀底泥化学性质在芦苇生境下的变化[J]. *中国环境科学*, 25(4): 450-454
- Yang Z, Li G B, Wang D W, *et al.* 2005. The transformation of chemical property of sediment in Baiyangdian Lake under reed's biosphere [J]. *China Environmental Science*, 25(4): 450-454 (in Chinese)
- 曾从盛, 张林海, 全川. 2009. 闽江河口湿地芦苇和互花米草氮、磷养分季节动态[J]. *湿地科学*, 7(1): 16-24
- Zeng C S, Zhang L H, Tong C. 2009. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus contents of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in the wetlands of Min River Estuary [J]. *Wetland Science*, 7(1): 16-24 (in Chinese)
- 张婷, 刘静玲, 王雪梅. 2010. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J]. *环境科学学报*, 30(2): 261-267
- Zhang T, Liu J L, Wang X M. 2010. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(2): 261-267 (in Chinese)
- 张友民, 杨允菲, 王立军. 2006. 三江平原沼泽湿地芦苇种群生产与分配的季节动态[J]. *中国草地学报*, 28(4): 1-5
- Zhang Y M, Yang Y F, Wang L J. 2006. Studies on seasonal dynamics of production and allocation in *Phragmites australis* population in Sanjiang Wetland Plain [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 28(4): 1-5 (in Chinese)
- 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 1998. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. *生态科学*, 17(2): 37-42
- Zhao P, Sun G C, Peng S L. 1998. Ecophysiological research on nitrogen nutrition of plant [J]. *Ecological Science*, 17(2): 37-42 (in Chinese)
- 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 2005. 白洋淀最低生态水位研究[J]. *生态学报*, 25(5): 1033-1040
- Zhao X, Cui B S, Yang Z F. 2005. A Study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 25(5): 1033-1040 (in Chinese)
- 周晓红, 王国祥, 杨飞, 等. 2008. 刈割对生态浮床植物黑麦草光合作用及其对氮磷等净化效果的影响[J]. *环境科学*, 29(12): 3393-3399
- Zhou X H, Wang G X, Yang F, *et al.* 2008. Effects of cutting on photosynthesis and purification efficiencies on nitrogen and phosphorus of the *Lolium multiflorum* [J]. *Environmental Science*, 29(12): 3393-3399 (in Chinese)