

白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究

李 博, 刘存歧, 王军霞, 张亚娟

(河北大学生命科学学院, 河北 保定 071002)

摘 要:湿地生态系统具有很强的储碳、固碳能力,在全球碳循环中占有重要地位。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)的现存生物量和初级生产,并根据光合作用原理测算了其碳储量和固碳能力,进而从光能利用率的角度探讨了其固碳潜力。结果表明,白洋淀湿地芦苇的碳储量较大,为 $2.52\sim 3.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,平均 $2.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,且地下部分的生物量大于地上部分,两者比值为 $2.38\sim 3.30$,平均 2.90 ,地下部分碳储量是地上部分的近 3 倍。白洋淀湿地芦苇具有较强的固碳能力,为 $0.82\sim 1.65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是全国陆地植被平均固碳能力的 $1.7\sim 3.4$ 倍,全球植被平均固碳能力的 $2.0\sim 4.0$ 倍。白洋淀湿地芦苇的光能利用率仅为 $0.6\%\sim 1.2\%$,若提高到植物理论最大光能利用率 $5\%\sim 6\%$,则固碳能力可较目前提高 $3.2\sim 9.0$ 倍,达到 $6.60\sim 8.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,潜力很大。

关键词:白洋淀;芦苇;储碳;固碳

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2603-05

Carbon Storage and Fixation Function by *Phragmites australis*, a Typical Vegetation in Baiyangdian Lake

LI Bo, LIU Cun-qi, WANG Jun-xia, ZHANG Ya-juan

(College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Wetland ecosystems have strong ability for carbon storage and fixation, and play important roles in the global carbon cycle. To understand carbon storage and fixation conditions of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel in Baiyangdian Lake, a typical wetland ecosystem, field investigation was conducted on *P. australis* biomass and net primary productivity, followed by laboratory measurements. In accordance with the theory of photosynthesis, carbon storage and fixation by *P. australis* in the wetland were estimated. Potential carbon fixation of the vegetation was also discussed according to light efficiency. Results showed a great carbon storage in the typical wetland ecosystem of Baiyangdian Lake ($2.52\sim 3.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), at an average of $2.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Root biomass was larger than shoot biomass, and the ratio was about 3 ($2.38\sim 3.30$, at an average of 2.90). Thus root carbon storage was about 3 times that of shoot. A typical wetland like that of Baiyangdian Lake had a strong carbon fixation ability, $0.82\sim 1.65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; could be $1.7\sim 3.4$ times of the average carbon fixation of terrestrial vegetations in China, and $2.0\sim 4.0$ times of that of the world. According to the formula of light efficiency, it was still low, only $0.6\%\sim 1.2\%$. If the light efficiency were improved to be $5\%\sim 6\%$, the maximum in theory, the carbon fixation ability of the vegetation in the wetland would increase $3.2\sim 9.0$ times and reached $6.60\sim 8.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ per year, the potential carbon fixation would be huge.

Keywords: Baiyangdian Lake; *Phragmites australis*; carbon storage; carbon fixation

自工业革命以来,全球大气中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体浓度显著增加,其中 CO_2 浓度已从工业化前约 $280\text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 2005 年的 $379\text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$,温室效应引起全球性的气候变化受到各国的普遍关注^[1]。1997 年《京都议定书》首次以法律的形式规定了工业

化国家分阶段的温室气体减少排放限额。虽然自 20 世纪 70 年代以来,有关温室气体的研究愈发受到世界各国政府和学术界的关注^[2-3],但这方面的研究过去多集中在森林、草原和农业生态系统上^[4-7]。湿地作为地球上水陆相互作用形成的独特生境,与森林、海洋一起被列为全球三大生态系统,占地球表面积约 6.4%,为地球上 20% 的已知物种提供了生存环境,具有不可替代的生态功能,因此享有“地球之肾”的美誉^[8]。湿地普遍具有较高的初级生产力,其中植被可以通过光合作用吸收大气中的 CO_2 从而发挥储碳、固碳的重要

收稿日期:2009-08-07

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-007)

作者简介:李 博(1984—),男,河北邢台人,在读硕士,主要从事水域生态学与生态恢复方面研究。

E-mail:orange387387@gmail.com

通讯作者:刘存歧 E-mail:liucunqi@sina.com

生态服务功能,在全球碳循环中占有重要地位^[9]。近年来对湿地在相关方面的研究也逐步展开,有些研究已较为深入。湿地植物净同化的碳仅有 15%再释放到大气中,表明湿地生态系统能够作为一个抑制大气 CO₂ 浓度升高的碳汇^[10];全球湿地植物的平均固碳能力为 0.05~1.35 kg·m⁻²·a⁻¹^[11],北方泥炭地湿地植物的固碳能力为 0.31 kg·m⁻²·a⁻¹^[12];温带草本沼泽湿地生物量较高,中国三江平原湿地植物的固碳能力为 0.80~1.20 kg·m⁻²·a⁻¹^[13],长江口湿地植物的固碳能力为 1.11~2.41 kg·m⁻²·a⁻¹^[14]。但关于华北地区湿地植被的储碳、固碳能力的研究尚未见报道,故本研究以白洋淀湿地芦苇为例,研究了华北地区典型湿地植被的储碳、固碳能力,并从光能利用率的角度探讨了其固碳潜力,为该地区的碳循环研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 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,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。本区在地质构造上属于新生代冀中拗陷,在地貌上位于永定河和滹沱河的两个冲积扇所挟峙的扇间洼地之中,地势较平坦,海拔 5~10 m,自西向东微倾,坡降 1/6 000 左右。白洋淀流域因受河流泥沙的冲淤和人为影响,微地貌结构十分复杂,淀区被 39 个村落、3 700 条沟壕分割成大小不等、形状各异的 143 个淀泊,上游由潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河和白沟引河等河流注入,淀水经东部赵北口东流与海河相通,年均地表径流量 45.15 亿 m³。该区属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℃,最高气温 43.5℃,平均年积温 2 992~4 409℃。全流域多年平均降雨量为 563.7 mm^[15],年内分配不均,7—9 月占年降水量的 80%,年均水面蒸发 1 761.7 mm,蒸发和渗漏量接近 3×10⁸ m³。白洋淀地貌景观以水体为主,淀底西高东低,海拔 5.5~6.5 m(大沽高程),最适宜水位为 7~9 m。20 世纪 60 年代以来在白洋淀上游建水库 150 多座,总库容达 36.36 亿 m³^[16];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他年份;各年的水位变化趋势明显,水位最低值一般出现在 6 月,最大值出现在 9 月。根据安新县水利局记录,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 a 时间连续干淀。近年来,由于降水不多、上游来水很少,白洋淀淀区面积又逐渐萎缩^[17]。

淀内以沼泽为主,土壤营养物质丰富,生物种类繁多,是芦苇的理想产地。芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel)在白洋淀的分布广泛,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忽视的作用。但是自 20 世纪 70 年代以来,由于遇到干旱周期,加之上游工农业用水不断增加,导致湿地面积不断萎缩,苇地面积相应波动,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^[17],不仅影响到当地农民的收入,也影响到湿地生物多样性的保护及其生态服务功能的发挥。

1.2 研究方法

采样在 2009 年 7 月进行,样地选择在鸳鸯岛、北田庄和圈头区域的典型苇地,随机选取样方(1 m×1 m)。样地中芦苇的地上部分每年经人工进行收割后移除,地下部分则多年积累,不进行收获。

1.2.1 生物量和净初级生产力的测定

1.2.1.1 地上部分生物量的测定

统计样方内芦苇密度,之后采用“W”方法在样方内随机取芦苇 9 株,齐地割取,标记后带回实验室烘干称重。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。以平均单株干重乘以密度得到样方内的生物量(现存量)。

1.2.1.2 地上部分净初级生产力的测定

地上部分现存量即为地上部分净初级生产力。

1.2.1.3 地下部分生物量的测定

将地上部分齐地割取后,用铁锹挖出样方内(25 cm×25 cm×60 cm)土样放入网筛,筛选、冲洗、烘干至恒重,称重得到地下部分生物量。

1.2.1.4 地下部分净初级生产力的测定

地下部分生产力按照梅雪英等的方法,以地上部分现存量的 30%~80%进行估算^[14]。

1.2.2 光能利用率的计算

单位面积初级生产力的含能量和太阳辐射量之比,计算公式为:

$$P=Mq/\sum Q_d$$

式中: P 为光能利用率; M 为单位面积上净初级生产力(地上部分与地下部分之和); q 为单位重量植物干物质含能量,一般碳水化合物为 17.38 kJ·g⁻¹; $\sum Q_d$ 为太阳总辐射^[18],白洋淀湿地取值 5.36×10⁶ kJ·m⁻²^[17]。

1.2.3 碳的换算

以白洋淀湿地芦苇的有机质生产为基础,根据光合作用反应方程式推算每形成 1 g 干物质需要 1.62 g CO₂,进而计算固定碳的数量。

2 结果与分析

2.1 白洋淀芦苇的储碳能力

根据表 1 数据可见该区域芦苇生物量较高,为 5.76~7.88 kg·m⁻², 平均 6.64 kg·m⁻²; 碳储量较大,为 2.52~3.44 kg·m⁻², 平均 2.9 kg·m⁻²。芦苇的地下根茎为多年生,在土壤内纵横伸展,采样区域亦无大规模人为挖取,所以地下部分生物量大于地上部分,地下/地上生物量比率为 2.38~3.30, 平均 2.90, 即地下部分碳储量是地上部分的近 3 倍。

表 1 白洋淀芦苇的生物量及碳储量(kg·m⁻²)

Table 1 Standing biomass and carbon storage of *Phragmites australis* in Baiyangdian Lake (kg·m⁻²)

项目 Item	生物量 Biomass		碳储量 Carbon storage	
	范围 Range	平均 Average	范围 Range	平均 Average
地上部分 Aboveground	1.44~2.09	1.7	0.63~0.91	0.74
地下部分 Underground	4.32~5.79	4.94	1.89~2.53	2.16
合计 Total	5.76~7.88	6.64	2.52~3.44	2.90

2.2 白洋淀芦苇的固碳能力

本区域芦苇具有较高的初级生产力(表 2),包括地上部分和地下部分。地上部分可以分为茎、叶片、叶鞘等构件,生物量合计达 1.44~2.09 kg·m⁻²·a⁻¹,固碳能力达 0.63~0.91 kg·m⁻²·a⁻¹,不同构件固碳能力顺序为茎>叶片>叶鞘;地下根茎部分为多年生,年净初级生产力为按地上部分现存量的 30%~80%估算,即地下部分固碳量为 0.19~0.73 kg·m⁻²·a⁻¹。综上,白洋淀湿地芦苇具有很强的固碳能力,可达 0.82~1.65 kg·m⁻²·a⁻¹。

表 2 白洋淀芦苇的净初级生产力及固碳能力(kg·m⁻²·a⁻¹)

Table 2 Net primary productivity and carbon fixation capacity of *Phragmites australis* in Baiyangdian Lake(kg·m⁻²·a⁻¹)

项目 Item	净初级生产力 Net Primary Productivity	固碳能力 Carbon fixation
地上部分 Aboveground	茎 Stem	0.85~1.23
	叶片 Lamina	0.31~0.41
	叶鞘 Sheath	0.20~0.49
地下部分 Underground	0.43~1.67	0.19~0.73
合计 Total	1.87~3.78	0.82~1.65

a⁻¹。白洋淀湿地 2003 年由遥感方法测量的芦苇生长面积为 1.526×10⁴ hm²^[19],据此可以估算该地区芦苇的年固碳量可以达到 1.25~2.52×10⁵ t,具有显著的生态服务功能。

2.3 白洋淀芦苇的固碳潜力

根据光能利用率计算公式^[18],白洋淀湿地芦苇的茎初级生产中光能利用率仅为 0.6%~1.2%,而理论上植物的最大光能利用率为 5%~6%^[20],因此白洋淀湿地芦苇的净初级生产力有很大的提高空间,植被的固碳能力有增强的潜力(表 3)。若白洋淀湿地芦苇的光能利用率提高到理论最大值,则其固碳能力可提高到目前的 4.2~10.0 倍,即 6.60~8.25 kg·m⁻²·a⁻¹。

表 3 不同光能利用率条件下的净初级生产力和固碳能力

Table 3 The carbon fixation capacity and net primary productivity

under different light utilizing rates

光能利用率/%	净初级生产力/kg·m ⁻² ·a ⁻¹	固碳能力/kg·m ⁻² ·a ⁻¹
0.6~1.2	1.87~3.78	0.82~1.65
1.2~2.4	3.78~7.56	1.65~3.30
2.4~3.6	7.56~11.34	3.30~4.95
3.6~4.8	11.34~15.12	4.95~6.60
4.8~6.0	15.12~18.90	6.60~8.25

3 讨论

芦苇在白洋淀湿地典型生长在高于水面的台地以上,水中不能形成优势群落。台地上高程高,沉积物粒度细,其中氮、磷、有机质含量也较高,土壤肥沃,利于芦苇的生长发育,为芦苇的较高储碳、固碳能力打下了坚实的基础。此外,从芦苇自身的生理特性分析,生长在台地上的芦苇叶周围的碳含量远高于水环境中,芦苇具有类似于陆生植物的气生叶,可以直接利用空气中的 CO₂ 进行光合作用,使环境中的碳含量不再成为光合作用效率的限制因素;芦苇植株发达的根茎、密集着生的叶片以及高的蒸腾作用强度,可减弱呼吸作用、降低叶面温度从而储藏较多的净光合作用产物。所以,白洋淀湿地芦苇具有较高的储碳、固碳能力。

湿地植被一般具有较高的地下/地上生物量比率,多年生植物的根茎常年保持在地下更是如此。梅雪英等研究发现长江口芦苇带湿地的地下/地上生物量比率为 2.96;亦有研究认为,芦苇不仅具有较高的地下/地上生物量比率,且不同地点的比率变化很大^[14]。本研究发现,白洋淀湿地芦苇的地下/地上生物量比率为 2.38~3.30, 平均 2.90, 地下部分碳储量是地上部分的近 3 倍。因此,地下的根茎部分是白洋淀湿地芦苇

碳储存的主要场所。

2000 年中国陆地植被固碳能力为 $4.94\times10^{12}\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均 $0.49\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[21]; 全球植被固碳能力平均为 $0.41\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[22]。据此可以推算白洋淀湿地芦苇的固碳能力是全国陆地植被平均固碳能力的 1.7~3.4 倍, 全球植被平均固碳能力的 2.0~4.0 倍。与中国不同生态系统的固碳能力相比, 由于白洋淀湿地的芦苇种群郁闭度较高, 其平均固碳能力强于城市、河流、湖泊等生态系统, 与相同植被覆盖度的常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林等森林生态系统(表 4)相当^[14]。

表 4 不同生态系统的固碳能力^[14]
Table 4 Carbon fixation ability of different ecosystems($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

编号 Code	生态系统类型 Ecosystem type	平均植被覆盖度 Mean vegetation coverage/%	固碳能力 Carobn fixation/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
1	常绿阔叶林 Broad leaf evergreen forest	64.2	1.63
2	落叶针叶林 Needle leaf deciduous forest	41.8	1.08
3	常绿针叶林 Needle leaf evergreen forest	55.5	1.07
4	落叶阔叶林 Broad leaf deciduous forest	48.1	1.06
5	灌丛 Bush	45.2	0.75
6	沼泽/湿地 Swamp	39.2	0.61
7	耕地 Farmland	40.5	0.48
8	海边湿地 Seaside wetland	30.2	0.37
9	城市 City	30.1	0.23
10	河流 River	32.8	0.22
11	湖泊 Lake	19.4	0.15

4 结论

白洋淀湿地芦苇的生物量较高, 为 $5.76\sim7.88\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均 $6.64\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 植株碳储量较大, 为 $2.52\sim3.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均 $2.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 且地下部分的生物量大于地上部分, 两者比值为 2.38~3.30, 平均 2.90, 地下部分碳储量是地上部分的近 3 倍。白洋淀湿地芦苇具有较强的固碳能力, 为 $0.82\sim1.65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 是全国陆地植被平均固碳能力的 1.7~3.4 倍, 全球植被平均固碳能力的 2.0~4.0 倍。与中国不同生态系统相比, 白洋淀湿地的芦苇种群固碳能力强于城市、河流、湖泊等生态系统, 与相同植被覆盖度的森林生态系统相当。白洋淀湿地芦苇的光能利用率仅为 0.6%~1.2%, 若提高到植物理论最大光能利用率 5%~6%, 则固碳能力可

提高为目前的 4.2~10.0 倍, 达到 $6.60\sim8.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 潜力很大。

参考文献:

- [1] 水利部应对气候变化研究中心. 气候变化权威报告-IPCC 报告[J]. 中国水利, 2008(2):38-40.
Research center for climate change, Ministry of water resources. Intro-
duction of IPCC Reports[J]. *China Water Resources*, 2008(2):38-40.
- [2] Bluemle J P, Sabel J M, Karlén W. Rate and magnitude of past global
climate changes[J]. *Environmental Geosciences*, 1999, 6:63-75.
- [3] Adams J M, Piovesan G. Uncertainties in the role of land vegetation in
the carbon cycle[J]. *Chemosphere*, 2002, 49:805-819.
- [4] Clark S B, David B, Zoe H. Carbon sink by the forest sector-options and
needs for implementation[J]. *Forest Policy and Economics*, 2002, 4:65-
77.
- [5] Betts R A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by
decreases in surface albedo[J]. *Nature*, 2000, 408:187-190.
- [6] Dixon R, Brown S, Houghton R, et al. Carbon pools and flux of global
forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263:185-190.
- [7] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力
研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(1):11-19.
ZHOU Guang-sheng, ZHANG Xin-shi. Study on NPP of natural vegeta-
tion in China under global climate change[J]. *ACTA Phytocologica Sini-
ca*, 1996, 20(1):11-19.
- [8] 杨永兴. 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, 2002, 21(2):111-120.
YANG Yong-xing. Main characteristics, progress and prospect of inter-
national wetland science research[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21
(2):111-120.
- [9] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test
of our knowledge of earth as a system[J]. *Science*, 2000, 290:291-296.
- [10] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are Phragmites dominated wetlands a
net source or net sink of greenhouse gases?[J]. *Aquatic Botany*, 2001,
69:313-324.
- [11] Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wet-
lands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and
possible methane emissions[J]. *Journal of Atmosphere Chemistry*, 1989,
8(4):307-358.
- [12] Crill M P, Bartlett K B, Harriss R C, et al. Methane flux from Minnesota
peatlands[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1988, 2:371-384.
- [13] 马学慧, 吕宪国, 杨 青, 等. 三江平原沼泽地碳循环初探 [J]. 地理
科学, 1996, 16(4):323-330.
MA Xue-hui, LV Xian-guo, YANG Qing, et al. Carbon cycle of a
marsh in Sanjiang Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(4):
323-330.
- [14] 梅雪英, 张修峰. 长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究——以
崇明东滩芦苇为例[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2):269-272.
MEI Xue-ying, ZHANG Xiu-feng. Carbon storage and fixation by a
typical wetland vegetation in Changjiang River Estuary-A case study of
Phragmites australis in east beach of Chongming Island [J]. *Chinese
Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2):269-272.

- [15] 赵 翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报, 2005, 25(5):1033-1040.
- ZHAO Xiang, CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. A Study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2005, 25(5):1033-1040.
- [16] 朱宣清, 何乃华, 张圣凯, 等. 白洋淀水域动态与演变的遥感研究[J]. 地理科学, 1992, 12(4):370-378.
- ZHU Xuan-qing, HE Nai-hua, ZHANG Sheng-kai, et al. Remote sensing research of water dynamics and the evolution of Baiyangdian Lake[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1992, 12(4):370-378.
- [17] 安新县地方志编撰委员会. 安新县志[M]. 北京: 新华出版社, 2000: 10-17.
- Local Editor Commission of Anxin. Anxin[M]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2000: 10-17.
- [18] 梅雪英, 张修峰. 长江口湿地海三棱藨草的储碳、固碳功能研究——以崇明东滩为例[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):360-363.
- MEI Xue-ying, ZHANG Xiu-feng. Carbon storage and fixation fuction of *Scirpus mariqueter* in Changjiang River estuary: A case study of Chongming Dongtan Wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):360-363.
- [19] 徐卫华, 欧阳志云, Iris v D, 等. 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, 2005, 19(4):181-189.
- XU Wei-hua, OUYANG Zhi-yun, Iris v D, et al. Reed land change and its relationship to water level in Baiyangdian Lake since 1987[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4):181-189.
- [20] Loomis R S, Williams W A. Maximum crop productivity: an estimate[J]. *Crop Science*, 1963, 3(1):67-72.
- [21] 何 浩, 潘耀忠, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统服务价值测量[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6):1122-1127.
- HE hao, PAN Yao-zhong, ZHU Wen-quan, et al. Measurement of terrestrial ecosystem service value in China. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6):1122-1127.
- [22] 李银鹏, 季劲钧. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究[J]. 地理学报, 2001, 56(4):379-389.
- LI Yin-peng, JI Jin-jun. Simulations of carbon exchange between global terrestrial ecosystem and the atmosphere[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4):379-389.