

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.015

水力条件对芦苇湿地系统 DO 质量浓度的影响

程康睿¹, 朱伟^{1,2}, 董婵¹, 汤苏晨¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要:就水位及水力负荷对湿地系统中 DO 质量浓度的影响进行实验。结果表明:随着水位的不断提高,芦苇湿地系统中的 DO 质量浓度呈现出不断升高的趋势,且在 300~550 mm 水位区间增加趋势比较明显,随着水位的再度升高,在 550~650 mm 水位区间 DO 质量浓度增加趋势趋于平稳;随着水力负荷的不断增大,芦苇湿地系统中的 DO 质量浓度呈现先增加后减小的趋势,本实验中最适合的水力负荷在 0.8968~1.2230 m³/(m²·d) 之间。

关键词:人工湿地;芦苇;DO;水位;水力负荷

中图分类号:X832

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2014)03-0076-05

Effects of different hydraulic conditions on DO concentration in *Phragmites australis* wetland

CHENG Kangrui¹, ZHU Wei^{1,2}, DONG Chan¹, TANG Suchen¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, the concentrations of dissolved oxygen at different water levels and different hydraulic loads were investigated through an experiment. The results show that the dissolved oxygen concentration in the *Phragmites australis* wetland increased with the water level, and the increasing trend was significant when the water level ranged from 300 mm to 550 mm. When the water level ranged from 550 mm to 650 mm, the dissolved oxygen concentration showed a steadily increasing trend. As the hydraulic loads increased, the dissolved oxygen concentration in the *Phragmites australis* wetland increase initially, and then decreased. In this experiment, the suitable hydraulic loads were between 0.8968 and 1.2230 m³/(m²·d).

Key words: constructed wetland; *Phragmites australis*; DO; water level; hydraulic loads

作为污水处理厂尾水和分散型农村生活污水的处理方法之一,人工湿地倍受关注^[1]。一些研究表明,相对于去除有机物和磷而言,人工湿地的脱氮效率经常偏低,例如,在伊朗一用于处理市政污水的芦苇潜流湿地床中,COD、BOD、TSS 的去除率分别达到 86%、90% 和 89%,然而 TN 的去除率只有 34%^[2]。脱氮过程需要利用人工湿地中的缺氧环

境、厌氧环境和好氧环境,促进微生物的硝化反应和反硝化反应,达到脱氮的目的^[3-5]。Sun 等^[6]通过实验发现湿地系统中氧气的消耗主要是有机物的去除消耗和硝化作用消耗两个部分。高敏等^[7]发现湿地中 COD、NH₄⁺-N、TN 质量浓度的变化趋势与 DO 质量浓度显著相关,DO 质量浓度越高,越有利于有机物和氮的去除。可见,人工湿地中 DO 的质量浓度

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB719804);江苏省重点基金(BK2011025);国家自然科学基金(51278165)

作者简介:程康睿(1989—),男,硕士研究生,研究方向为人工湿地污水处理。E-mail:chengkangrui@126.com

通信作者:朱伟,教授。E-mail:zhuweiteam.hhu@gmail.com

是影响污染物去除的主要因素之一。

人工湿地中氧的来源之一是植物的释氧。植物释氧受到光强、温度、湿度以及营养盐水平等因素的影响。此外,水的动力学条件可能也对植物的释氧产生较大的影响,从而影响人工湿地系统中 DO 的质量浓度。Sasikala 等^[8]研究了水文条件对根系释氧的影响,以垂直潜流湿地为对象实测了水位起伏对植物根系释氧的影响,结果发现静水时根系的释氧量远远大于水位波动时的数值,从而认为水位波动会引起根系释氧量降低。王世和等^[9]研究水力条件对人工湿地去除污染物的影响,认为水深、水力负荷、水力停留时间是影响人工湿地运行的 3 个要素,对某一人工湿地而言,实际的运行中均存在一个水力条件最佳值。但水位及水力负荷的变化怎样影响人工湿地中的 DO 质量浓度,仍然是一个尚待明确的问题。

本文就水动力条件如何影响人工湿地中植物释氧的问题,使用柱状人工湿地模型,通过不同水位及水力负荷下湿地系统中 DO 质量浓度的变化研究不同动力条件对人工湿地中 DO 质量浓度的影响。

1 材料和方法

1.1 实验装置

采用自制 PVC 材料人工湿地模拟单元柱,实验柱高 1000 mm,直径 150 mm,柱中填料采用平均孔隙率为 0.46 的火山渣,基质上方涂加 30 mm 厚凡士林以隔绝空气中的氧。在湿地单元沿程布置的进水口、出水口见图 1。实验用水采用自配无氧水,利用 Na_2SO_3 粉末去除水中的 DO。

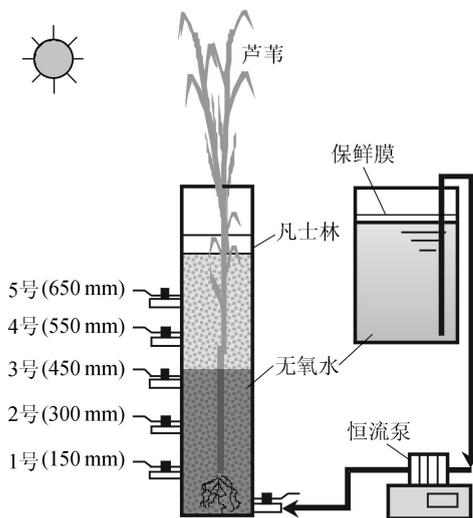


图 1 实验装置示意图

1.2 采样及检测方法

实验共分为两个部分,两个部分共用一套装置。

a. 5 种不同水位条件的实验。实验时间段为

2013 年 4—6 月,实验所用芦苇种植于半年前。在湿地系统运行稳定后,在滞水条件下设置 5 种不同水位,从下到上 5 种水位的高度分别为 150 mm(1 号)、300 mm(2 号)、450 mm(3 号)、550 mm(4 号)、650 mm(5 号),实验水位均淹没植物根系(图 1)。每个水位实验周期为 16h,从凌晨 5:00 到晚上 21:00,其中每隔 2h 取一次样。

b. 6 种不同水力负荷条件的实验。实验时间段为 2013 年 9—11 月,实验所用芦苇种植于 2013 年 6 月。在湿地系统运行稳定后,在水位保持在 650 mm 的条件下,采用间歇流运行(其中装置先运行 1.5 h,采样时停止运行,0.5 h 内完成采样)。6 种水力负荷分别为 0 、 $0.2446 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.4076 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.7338 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.8968 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.2230 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,试验周期为 16 h,从凌晨 5:00 到晚上 21:00。

为了保证湿地中的氧气全部由植物供给,采样时先用真空泵将饱和缸抽吸成真空,利用饱和缸中的负压,抽吸人工湿地柱中液体,抽吸完后迅速取样,并测量其中的 DO 质量浓度值,同时测量液体总体积。抽吸完柱中液体后,立刻向柱中加入无氧水,进行下一时段的实验。DO 质量浓度的测定方法为碘量法,方法来自《水和废水监测分析方法》(第四版)^[10]。光强测量方法采用便携式光强仪(MODELZDS-10F-2D),单位为 Lux。本文中以 PAR(光合有效辐射)计,其中 $1 \text{ Lux} = 0.019 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 实验结果与分析

2.1 不同水位条件下湿地系统中 DO 质量浓度变化规律

2.1.1 不同水位下湿地系统中 DO 质量浓度的日变化曲线

在不同水位下对湿地内部 DO 质量浓度进行昼夜连续实测,用饱和缸中测量的 DO 质量浓度值表示湿地系统中总 DO 质量浓度,并进行比较,结果见图 2。

由于天气原因,进行不同水位试验时,光强条件会发生变化,因此在图 2 中将 DO 质量浓度和光强同时进行了对比。从实测数据可以看出,湿地系统中的 DO 质量浓度随着光强的变化而出现明显的日周期性变化。上午,随光强的增加湿地系统中的 DO 质量浓度逐渐增大。下午,湿地系统中的 DO 质量浓度随光强的减弱而降低,在凌晨 5:00 之前以及晚上 8:00 以后光强为零的情况下,由于本实验中湿地系统中唯一的氧源(植物光合作用产生的植物根系释氧)消失,湿地系统中的 DO 质量浓度接近于 0,芦苇湿地系统中

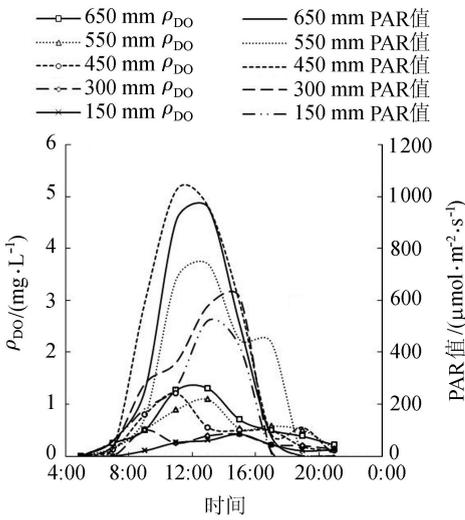


图2 不同水位下 PAR 值日变化规律

DO 质量浓度的峰值较光强的峰值滞后 2 h 左右,这一规律与 Dong^[11]的实测结果是相同的。由于植物释氧量与光强存在密切的关系,试验又难以避免每天光强所出现的差异,因此无法对水位变化引起的 DO 质量浓度变化直接用实测数据来比较。

2.1.2 不同水位下湿地系统中 DO 质量浓度的比较

Dong 等^[11]利用高斯函数拟合光强以及在相应光强条件下的植物根系释氧速率,结果发现植物根系释氧速率受到光强的影响非常显著,且释氧速率随着光强的增加呈指数增长趋势(式(1))。同时本实验湿地中的 DO 质量浓度(ρ_{DO})和植物根系释氧也存在一定的关系(式(2))。

$$V_0 = ae^{bP} \quad (1)$$

$$V_0 = \frac{1000\Delta O_2}{32nr} = \frac{1000Ah\rho_{DO}}{32nr} = fh\rho_{DO} \quad (2)$$

其中

$$\Delta O_2 = V\rho_{DO} = Ah\rho_{DO}$$

$$\rho_{DO} = \frac{1}{h}de^{bP}$$

$$f = \frac{1000A}{32nr}$$

式中: V_0 为植物根系释氧量, $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$; a 和 b 为湿地系统中 DO 质量浓度参数; P 为 PAR 值; ΔO_2 为氧气的增加量,mg,因为注入的是无氧水,此处的 ΔO_2 就是当时湿地系统的氧气总量; n 为一次实验经历的时间,本次 $n = 16 \text{ h}$; r 为实验所用芦苇的根重, g ; V 为每次实验时系统中溶液体积,L; A 为实验所用实验柱的底面积, dm^2 ; h 为每次实验时水位高度, dm ; d 为湿地系统中 DO 质量浓度参数。

由于实验所用芦苇根重 r 在整个实验过程中变化相对较小,将式(2)和式(3)合并得到式(4),发现 V_0 和 ρ_{DO} 及 h 呈线性关系。结合式(1)和(4)得到式(5)。在同样光强条件下, d 和 b 这两个参数的大

小决定植物释氧量的大小,在参数 b 相差不大的情况下,参数 d 将主要影响湿地系统中的 DO 质量浓度。

将本次试验中得到的各组试验的光强和 DO 质量浓度用式(5)进行拟合得到图3及表1。由此可以看出,随着水位越高,参数 d 越大,也就是植物释氧量越大,水中 DO 有增加的趋势。如果使用拟合得到的公式对光强相同时湿地中 DO 质量浓度进行计算,可以得到图4。从图4中可以明显看出,随着水位的上升,植物释氧量增加,湿地系统中 DO 质量浓度上升。

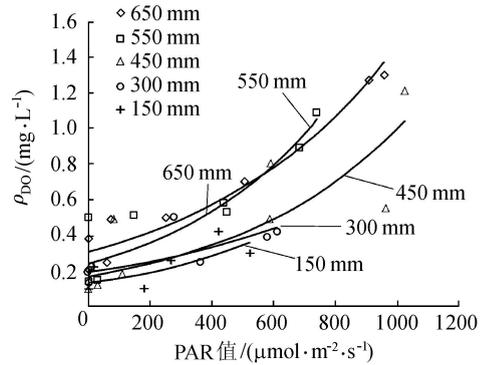


图3 不同水位条件下 PAR 值和 DO 质量浓度拟合曲线

表1 各水位下拟合曲线的参数值比较

| 水位/mm | d/h | d | b |
|-------|--------|---------|--------|
| 650 | 0.3045 | 1.97925 | 0.0016 |
| 550 | 0.2409 | 1.32495 | 0.0020 |
| 450 | 0.1690 | 0.76050 | 0.0018 |
| 300 | 0.1912 | 0.57360 | 0.0014 |
| 150 | 0.1288 | 0.19320 | 0.0020 |

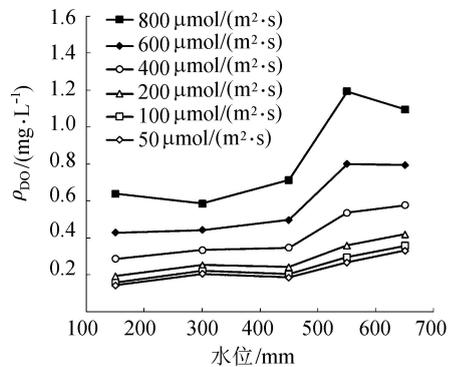


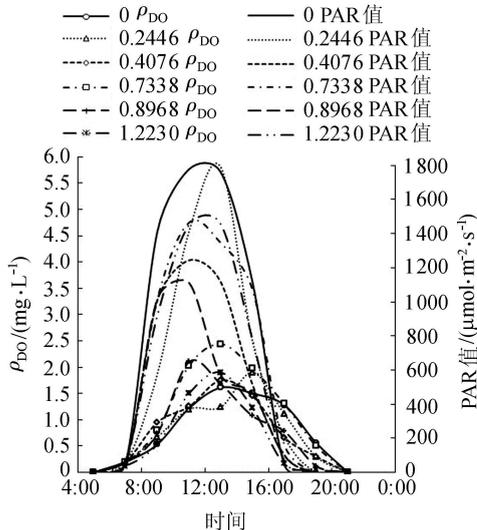
图4 不同光强条件下各水位的系统 DO 质量浓度

2.2 不同水力负荷下植物根系的释氧规律

2.2.1 不同水力负荷下湿地系统中 DO 质量浓度的日变化曲线

与不同水位下对湿地内部 DO 质量浓度的测量方式相同,用饱和缸中测量的 DO 质量浓度值表示湿地系统中总 DO 质量浓度,并进行比较,得到不同水力负荷下湿地系统的 DO 质量浓度日变化规律,见图5。

图5显示出不同水力负荷条件下,芦苇湿地系



注:0.2446 ρ_{DO} 表示0.2446 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 水力负荷下的 ρ_{DO} 值;
0.2446PAR值表示0.2446 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 水力负荷下的PAR值。
依此类推。

图5 各水力负荷下湿地系统的DO质量浓度的日变化规律

统中DO质量浓度的日变化规律。与不同水位条件下湿地系统中的DO质量浓度相同的是,湿地系统中的DO质量浓度在上午时刻随着光强的增加而增加,下午时随光强的减弱而降低,在凌晨5:00之前以及20:00以后光强为零的情况下,湿地系统中的DO接近于0。且各个水力负荷条件下当天光强的最高点都在11:00左右,芦苇湿地系统中的DO质量浓度的最高点集中在13:00左右。芦苇湿地系统中DO质量浓度峰值较光强峰值滞后2h左右。

2.2.2 不同水力负荷下湿地系统中DO质量浓度的比较

为了平衡光强的因素,对上述实验数据进行指数拟合处理,得到图6以及表2。由式(5)得知系统中DO质量浓度随着光强呈指数增加,其中参数 d 影响指数方程的起始值,参数 b 影响曲线的增长率。所以不同水力负荷条件下在参数 b 相同的条件下($b=0.013$),系统中的DO质量浓度曲线是随着水力负荷的增加呈现先增加后减少的趋势。虽然在水力负荷为0.2446 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 时,参数 d 并没有随着水力负荷的增加而增加,但是此时参数 b 却相对较大,表明曲线随后的增加趋势相对较大,以至于在此水力负荷下,系统中DO质量浓度曲线在图示的光强范围内是介于0曲线和0.4076 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 曲线之间的。在水力负荷为1.2230 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 时,由于参数 d 相对太小,导致在一定光强范围内其系统的DO质量浓度一直很低。虽然在不同水力负荷条件下得到的参数不尽相同,但是最终得到的结果是,随着水力负荷的增加,系统中DO质量浓度呈现

先上升后下降的趋势。

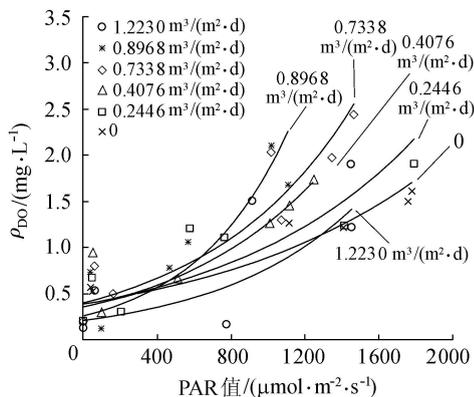


图6 不同水力负荷条件下PAR值和DO质量浓度拟合曲线

表2 各水力负荷下拟合曲线的参数值比较

| 水力负荷/ ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) | d/h | d | b |
|--|--------|--------|--------|
| 0 | 0.3896 | 2.5324 | 0.0080 |
| 0.2446 | 0.3812 | 2.4778 | 0.0010 |
| 0.4076 | 0.3560 | 2.3140 | 0.0013 |
| 0.7338 | 0.3953 | 2.5694 | 0.0013 |
| 0.8968 | 0.2553 | 1.6594 | 0.0020 |
| 1.2230 | 0.2028 | 1.3182 | 0.0013 |

同样,使用拟合得到的公式对光强相同时湿地中DO质量浓度进行计算,可以得到图7。由图7可以观察到,湿地系统中的DO质量浓度随着光强的增加是呈现出先增加后降低的趋势。随着水力负荷的不断增加,DO质量浓度先是随着水力负荷的增加而增加,当水力负荷再度增加时,湿地系统中的DO质量浓度开始逐渐下降。

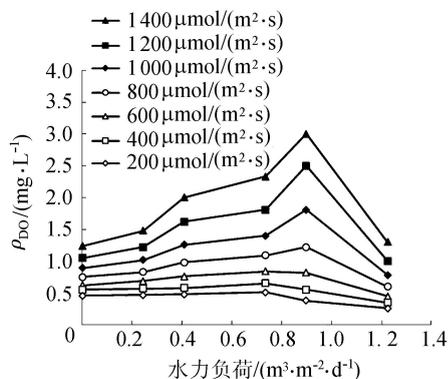


图7 不同PAR值下各水力负荷的系统DO质量浓度

3 讨论

随着水位的不断增加,水中DO质量浓度有所增加。分析这一现象发生的原因,可以认为,在水位较低的条件,植物的一部分根茎处于非饱和的滤料介质中,这一部分植物释放的氧气没有直接进入水中。而随着水位的上升,以前在包气带中的根茎逐渐淹没在水中,原先根茎释放到空气中的氧气转

为向水中释放并且溶解,导致随着水位的增加人工湿地系统中的 DO 质量浓度上升。本次使用的湿生植物芦苇出现水下根须发育茂盛的现象。在试验结束后,把整株植物从湿地系统中拿出来观察,发现被水淹没的茎秆节点以下部分开始逐渐生长出新的须根。可见,随着水位的上升,湿地系统中被水淹没的生物量也有随之增加的趋势,这也是引起湿地系统中 DO 质量浓度上升的原因之一。

对于湿生植物而言,水深通常是影响其生存状态的主要因子。植物通过多年的繁殖演变逐渐适应了某种特定的水位环境。随着地下水位的不断上升,芦苇湿地系统中的 DO 质量浓度逐渐增加,当水位到达 550 ~ 650 mm 时,DO 质量浓度增加趋势趋于平稳。这主要是芦苇经过多年的进化演变适应了这种生境的结果。彭玉兰等^[12]研究了九寨沟芦苇湿地床中 4 种不同水位下的生物量和生物繁殖能力,发现在-150 mm (水在土层表面下 150 mm)的生境中,叶生物量百分比(叶生物量占单株总生物量的百分比,46.1%)最大,这与本实验中水位在 650 mm 时,芦苇离基质的距离 200 mm 相近。

植物通过光合作用产生的氧气,一部分由叶片释放到空气中,一部分通过茎的传输最终通过植物的根系释放到整个湿地系统中,因为茎起到传输氧气的作用,大部分的氧气通过植物的根系释放,使得在水流不动的状态下,释放的氧气主要集中在根系周围^[13]。

当水力负荷较低时,湿地系统中的水流动相对比较缓慢,植物根系释放氧气到植物根系周围,而不是其他部位,导致植物根系内外氧气浓度差下降,进而导致植物根系释放的氧气量下降,系统中的 DO 质量浓度相对较低。随着水力负荷的逐步增大,系统中的水流动相对频繁,植物根系释放的氧气能很快被水流带走,增加了氧气在湿地单元中的流动,同时增加了植物系统内外的氧气浓度差,并促进了植物根系的氧气释放。水流的扰动也加速了氧气溶解到水中的速度。

图 8 所示为每 2h 时从 5 号出水口取样测量所得的 5 号出水口处的 DO 质量浓度。由图 8 可以看

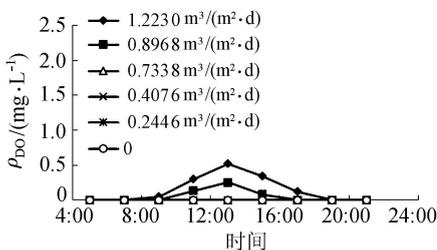


图 8 5 号出水口不同水力负荷下不同时刻出水中 DO 质量浓度

出,当水力负荷为 0.8968 m³/(m²·d) 时,水流流速相对过大,湿地系统中部分的氧气还没来得及利用就被水流带出系统外;当水力负荷再次增大到 1.2230 m³/(m²·d) 时,被水流带出的氧气更多,出现水力负荷过大的情况下湿地系统中 DO 质量浓度下降的现象。

4 结 语

本实验研究表明,水位和水力负荷都会影响湿地系统中 DO 的质量浓度。随着水位的不断增加,湿地系统中的 DO 质量浓度增加,且在水位为 550 ~ 650 mm 时趋于平稳;在水位为 650 mm 的固定条件下,给予不同的水力负荷会影响湿地系统中的 DO 质量浓度,在实际的运行过程中存在一最佳水力负荷值,大于或者小于该水力负荷值都会使湿地系统中的 DO 质量浓度下降。

参考文献:

- [1] 董贝,刘杨,杨平. 人工湿地处理农村生活污水研究与应用进展[J]. 水资源保护,2011,27(2):80-86. (DONG Bei, LIU Yang, YANG Ping. Research and application progress of rural domestic wastewater treatment with constructed wetlands [J]. Water Resources Protection, 2011,27(2):80-86. (in Chinese))
- [2] KIVAIISI A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review [J]. Ecological Engineering, 2011, 16 (4) : 545-560.
- [3] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the rootzone method [J]. Water Science & Technology, 1987, 19: 107-118.
- [4] VYMAZA J, BRIX H, COOPER P, et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands in Europe [M]. Leiden: Backhuys Publishers, 1998. 17-66.
- [5] JAYAWEEER G R, MIKKELSEN D S. Assessment of ammonia volatilization from flooded soil systems [J]. Advances in Agronomy, 1991, 45: 303-365.
- [6] SUN G, ZHAO Y Q, ALLEN S, et al. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system [J]. Journal of Biotechnology, 2005, 115: 189-197
- [7] 高敏,朱伟,董婵,等. 垂直流人工湿地中污染物昼夜及沿程变化规律 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (3) : 49-52. (GAO Min, ZHU Wei, DONG Chan, et al. Diurnal and spatial variations of pollutants in vertical flow constructed wetland [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (3) : 49-52. (in Chinese))

(下转第 89 页)

2004,29(15/18):1233-1241.

- [19] LIU X, REN L, YUAN F, et al. Quantitative the effect of land use and land cover changes on green water and blue water in northern part of China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(6):735-747.
- [20] GERTEN D, HOFF H, BONDEAU A, et al. Contemporary "Green" water flows: simulations with a dynamic global vegetation and water balance model [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(6/7):334-338.
- [21] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of fresh water availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2):30-49.
- [22] 吴洪涛, 武春友, 郝芳华, 等. 绿水的多角度评估及其在碧流河上游地区的应用[J]. 资源科学, 2009, 31(3):420-428. (WU Hongtao, WU Chunyou, HAO Fanghua, et al. Assessment of green water from multi-angle view at catchment scale [J]. Resources Science, 2009, 31(3):420-428. (in Chinese))
- [23] 邱国玉, 尹婧, 熊育久, 等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2):211-218. (QIU Guoyu, YIN Jing, XIONG Yujiu, et al. Studies on the effects of climatic warming-drying trend and land use change on the runoff in the Jinghe River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2):211-218. (in Chinese))
- [24] 张杰, 贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4):6-10. (ZHANG Jie, JIA Shaofeng. Study on difference of blue-green water in Huangshui Basin and green water under different types of land use

based on SWAT model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4):6-10. (in Chinese))

- [25] FARAMARZI M, ABBASPOUR K C, SCHULIN R, et al. Modeling blue green water resources available in Iran [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(3):486-501.
- [26] 徐宗学, 左德鹏. 拓宽思路, 科学评价水资源量: 以渭河流域蓝水绿水水资源量评价为例 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1):12-16. (XU Zongxue, ZUO Depeng. Scientific assessment of water resources with broaden thoughts; a case study on the blue and green water resources in the Wei River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2013, 11(1):12-16. (in Chinese))
- [27] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE R H. Evapotranspiration from sparse crops: an energy combination theory [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111:839-855.
- [28] 冯景泽, 王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述 [J]. 水利学报, 2012, 43(8):914-925. (FENG Jingze, WANG Zhongjing. A review on evapotranspiration estimation models using remotely sensed data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8):914-925. (in Chinese))
- [29] JEWITT G. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31(15/16):753-762.
- [30] PEREIRA L S, CORDERY I, IACOVIDES I. Coping with water scarcity: addressing the challenges [M]. Springer Netherlands, 2009:77-98.

(收稿日期:2013-09-13 编辑:高渭文)

(上接第 80 页)

- [8] SASIKALA S, TANAKA N, WAHWAH H S Y, et al. Effects of water level fluctuation on radial oxygen loss, root porosity, and nitrogen removal in subsurface vertical flow wetland mesocosms [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(3):410-417.
- [9] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3):359-362. (WANG Shihe, WANG Wei, YU Yan. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(3):359-362. (in Chinese))
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] DONG C, ZHU W, GAO M, et al. Diurnal fluctuations in oxygen release from roots of *acorus calamus* linn in a

modeled constructed wetland [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A, 2011, 46:224-229.

- [12] 彭玉兰, 涂卫国, 包维楷, 等. 九寨沟自然保护区 4 种水深梯度下芦苇分株地上生物量的分配与生长 [J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(2):153-157. (PENG Yulan, TU Weiguo, BAO Weikai, et al. Above ground biomass allocation and growth of phragmites australis ramets at four water depths in the Jiuzhaigou Nature Reserve, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, 14(2):153-157. (in Chinese))
- [13] United States Environment Protection Agency. Manual constructed wetlands treatment of municipal wastewaters [M]. Ohio: USEPA, 2000.

(收稿日期:2013-11-22 编辑:彭桃英)